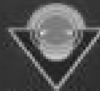
BRIAN GREENE

EVRENİN Zarafeti

süpersicimler,
gizli boyutlar ve
nihai kuram arayışı

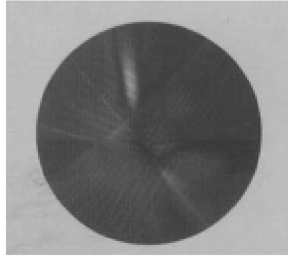


TÜBİTAK
POPÜLER BİLİM KİTAPLARI

Bir şey keşfetmenin insanın yeni bir şey görmesi değil de bakışını biçimlendirmesi demek olduğu söylenir. Evreni sicim kuramı tarafından biçimlendirilmiş bir bakışla gören okurlar yeni manzaranın nefes kesici olduğunu görecek.

Önde gelen sicim kuramcılarından Brian Greene, çok açık ve anlaşılır bir dille yazdığı bu kitapta okuyucuya nihai kuram arayışının ardındaki bilimsel hikâyeyi ve bilim insanlarının çabalarını anlatıyor. Heyecan verici ve çığır açıcı fikirlerin, örneğin uzayın dokusunda gizli yeni boyutlar, temel parçacıklara dönüşen kara delikler, uzay-zamanda yarıklar ve delikler, birbirlerinin yerine geçebilen çok büyük ve çok küçük evrenler ve bunlar gibi birçok başka fikrin, günümüzde fizikçilerin üstesinden gelmeye çalıştığı bazı sorunların çözümünde çok önemli bir yeri var.

Evrenin Zarafeti bu konuda yapılan keşifleri ve hâlâ çözülememiş gizemleri, durup dinlenmeden uzayın, zamanın ve maddenin nihai doğasını araştıran bilim insanlarının yaşadığı coşkuları ve hayal kırıklıklarını yetkinlik ve incelikle bize aktarıyor. Brian Greene akıllıca kullandığı benzetmelerle, fizikte bugüne kadar ele alınmış kavramlardan en karmaşık olanlarını gerçekten de eğlendirici bir anlatımla okuyucu için kavranabilir hale getiriyor ve bizi evrenin nasıl bir işleyişi olduğunu anlamaya daha önce hiç olmadığı kadar yaklaştırıyor.



TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları

Evrenin Zarafeti Süper sicimler, Gizli Boyutlar ve Nihai Kuram Arayışı Tbe Elegant Universe Superstrtngs, Hidden Dimensions, and the Questfor tbe Ultimate Theory

Brian Greene

Çeviri: Ebru Kılıç

Evrenin Zarafeti

süpersicimler, gizli boyutlar ve nihai kuram arayışı

Brian Greene

Çeviri Ebru KILIÇ

TÜBİTAK POPÜLER BİLİM KİTAPLARI

Anneme ve babamın anısına, sevgi ve minnetle.

Önsöz

Albert Einstein hayatının son otuz yılı boyunca, birleşik alan kuramı olarak bilinen kuramı -doğanın kuvvetlerini, tutarlı bir tek çerçeve içinde tanımlayabilen bir kuramı- yakalamaya çalıştı. Einstein'ı harekete geçiren nedenler, genellikle bilimsel çalışmalarla ilişkilendirdiğimiz şeyler, örneğin şu ya da bu deneysel veriyi açıklama çabası değildi. Tutkuyla sarıldığı bir inançtı onu harekete geçiren; evreni derinden anlamanın, onun en hakiki mucizesini, dayandığı ilkelerin basitliği ve kuvvetini ortaya koyacağı inancıydı. Einstein evrenin işleyişini, onun güzelliği ve zarafeti karşısında hepimizi hayretler içinde bırakacak önceden erişilmemiş bir açıklıkla resmetmeyi istiyordu.

Bu hayalini hiç gerçekleştiremedi, bunun da sebebi büyük ölçüde elindeki kâğıtların iyi olmamasıydı: Onun zamanında maddenin ve doğadaki kuvvetlerin temel niteliklerinin birkaçı ya bilinmiyordu ya da en iyi ihtimalle pek iyi anlaşılmamıştı. Fakat geçen yarım asır içinde yeni kuşaktan fizikçiler -çıkmaz sokaklara dalıp çıkarak- seleflerinin keşifleri üzerine çalışıp evrenin nasıl işlediğine dair daha eksiksiz bir kavrayış oluşturmak için parçaları birleştirmeyi sürdürdü. Bugün, Einstein'ın birleşik bir kuram arayışında olduğunu açıklamasından ve bunda başarılı olamamasından uzun zaman sonra, fizikçiler bu keşifleri, derinlikli görüşleri eklenti yerleri belli olmayan bir bütün haline getirmelerini sağlayacak bir çerçeve, prensipte bütün fiziksel olguları betimleyebilecek tek bir kuram bulduklarına inanıyor nihayet. Bu kitabın konusu da işte bu kuram, *süpersicim kuramı.*

Evrenin Zarafetini, fizik alanında ön cephelerdeki araştırmalardan doğan bu dikkat çekici görüşleri, geniş bir okur kesimi, özellikle de hiç matematik ve fizik eğitimi görmemiş okurlar için erişilebilir kılma çabasıyla kaleme aldım. Geçen birkaç yıl içinde süpersicim kuramı hakkında verdiğim konferanslarda, geniş kesimlerin, halihazırda sürmekte olan araştırmaların evrenin temel yasaları hakkında neler dediğini, bu yasaların kozmosu kavrayışımızda ne tür devasa bir yeniden yapılanma gerektirdiğini, devam etmekte olan nihai kuram

arayışını ne gibi zorlukların beklediğini anlama arzusuyla yanıp tutuştuğuna tanık oldum. Umuyorum ki bu kitap, Einstein ve Heisenberg'den bu yana fizik alanındaki büyük başarıları açıklayarak, onların keşiflerinin çağımızın atılımlarında nasıl kocaman çiçekler gibi açtığını göstererek bu merakı hem zenginleştirir hem doyurur.

Evrenin Zarafetinin biraz bilimsel birikimi olan okurların da ilgisini çekeceğini umuyorum. Umarım bu kitap bilim öğrencileri ve öğretmenleri için özel görelilik, genel görelilik ve kuantum mekaniği gibi modern fiziğin temel yapıtaşlarının bazılarına ışık tutar, araştırmacıların uzun zamandır aranan birleşik alan kuramına yaklaşırken duyduğu bulaşıcı heyecanı onlara da aktarır. Meraklı popüler bilim okurları için de kozmosu anlayışımıza taze kan sağlayan, son on yıl içinde gün ışığına çıkan ilerlemelerin birçoğunu açıklamaya çalıştım. Başka bilimsel disiplinlerde çalışan meslektaşlarım için de bu kitabın, sicim kuramcılarının nihai bir doğa kuramı arayışında kaydedilen ilerlemelerden dolayı neden bu kadar heyecanlı olduğuna dair dürüst ve tutarlı bir açıklama sunacağını umuyorum.

Süpersicim kuramı fizikteki başlıca keşiflerin birçoğundan yararlanan geniş ve derinlikli bir konudur. Kuram, büyük olanla ilgili kuramlarla, küçük olanla ilgili kuramları, kozmosun en ücra köşelerinden maddenin en küçük parçasına dek fiziği yöneten yasaları birleştirdiğinden, konuya yaklaşmanın birçok yolu vardır. Ben uzay ve zaman kavrayışımızın gelişmesine odaklanmayı tercih ettim. Bunun özellikle insanı saran bir gelişme çizgisi olduğunu gördüm, zengin ve büyüleyici bir harmanın içinden temel önemdeki yeni görüşlerle geçen bir yol. Einstein dünyaya uzay ve zamanın hiç bilmediğimiz, hayret verici biçimlerde davrandığını göstermişti. Bugün son araştırmalar, bu keşifleri birleştirmiş, kozmosun dokusuna işlenmiş birçok gizli boyuta sahip bir kuantum evreni ortaya çıkarmıştır; öyle boyutlardır ki bunlar, bir sarmaşıktan farkı olmayan geometrileri bugüne dek sorulmuş en temel soruları cevaplayacak anahtarı sunabilir. Bu kavramların bazıları çok ince olsa da, gerçekçi

benzetmelerle kavranabileceklerini göstereceğiz. Bu fikirlerin anlaşılması, evrenle ilgili şaşırtıcı ve devrimci bir bakış açısı sunar.

Kitap boyunca, okura bilim insanlarının mevcut kozmos kavrayışına nasıl ulaştığına dair sezgisel bir anlayış kazandırmaya çalışırken -genellikle benzetmeler ve metaforlar yoluyla- bilime yakın durmaya çalıştım. Fakat teknik dilden ve denklemlerden kaçındım, çünkü konuyla ilgili yeni kavramlar nedeniyle, okurun, fikirlerin gelişimini tam olarak izleyebilmesi için şurada burada durması, şurada bir bölüm üzerine düşünmesi, burada bir açıklamayı tartması gerekebilir. Son gelişmeleri konu alan dördüncü kısımdaki bazı bölümler kitabın geri kalan kısmına göre biraz daha soyuttur; okuru bu bölümler hakkında önceden uyarmaya, metni bu bölümlerin atlanmasının kitabın mantıksal akışını etkilemeyecek şekilde yapılandırmaya özen gösterdim. Ana metinde ortaya atılan fikirlerle ilgili kolay ve erişilebilir bir hatırlatma olması amacıyla bir bilimsel terimler sözlüğüne de yer verdim. İlgisiz okur dipnotları tümüyle atlamak isteyebilir, gayretli okursa notlarda metinde geçen konulara dair ayrıntılı açıklamalar bulacak, metinde basitleştirilerek ortaya konan fikirlerin açıklamalarıyla karşılaşacaktır, matematik eğitimi almış olanlar birkaç teknik gezintiye de çıkacaklardır.

Kitabın yazımı sırasında yardımlarını gördüğüm birçok kişiye teşekkür borçluyum. David Steinhardt, kitabın taslaklarını büyük bir dikkatle okuyup editöryel açıdan keskin bazı görüşlerini benimle cömertçe paylaştı, değer biçilemez bir teşvikte bulundu. David Morrison, Ken Vineberg, Raphael Kasper, Nicholas Boles, Steven Carlip, Arthur Greenspoon, David Mermin, Michael Popowits ve Shani Offen kitabın taslağını yakından inceleyip tepkilerini ve tavsiyelerini ayrıntılı bir biçimde ortaya koyarak sunuma büyük bir katkıda bulundular. Metni tamamen ya da kısmen okuyup tavsiyelerde bulunarak beni teşvik edenler arasında Paul Aspinwall, Persis Drell, Michael Duff, Kurt Gottfried, Joshua Greene, Teddy Jefferson, Marc Kamionkowski, Yakov Kanter, Andras Kovacs, David Lee, Megan McEwen, Nari Mistry, Haşan Padamsee, Ronen Plesser, Massimo Poratti, Fred Sherry, Lars Straeter, Steven Strogatz, Andrew Strominger, Henry Tye, Cumrun Vafa ve Gabriele Veneziano

dayer alıyor. Raphael Gunner'a başka birçok şeyin yanı sıra, yazımın erken bir aşamasında getirdiği, kitabın biçiminin genel olarak şekillenmesini sağlayan derinlikli eleştirilerinden, Robert Malley ye de kitap hakkında düşünmenin ötesine geçip kâğıda dökmem konusundaki nazik, fakat ısrarlı teşvikinden ötürü teşekkür ederim. Steven Weinberg ve Sidney Coleman değerli tavsiyelerde bulunup yardımlarını sundular, Carol Archer, Vicky Carstens, David Cassel, Anne Coyle, Michael Duncan, Jane Forman, Erik Jendresen, Gary Kass, Shiva Kumar, Robert Mawhinney, Pam Morehouse, Pierre Ramond, Amanda Salles ve Eero Simoncelli'yle de yararlı birçok fikir alışverişinde bulunmuş olduğumu teslim etmek benim için bir zevk. Olguların kontrol edilmesi ve referansların bulunmasındaki yardımlarından, yaptığım ilk karalamaları çizim haline getirmesinden dolayı Costas Efthimiou'ya borçluyum. Tom Rockwell, Efthimiou'nun çizimlerinden yararlanarak -bir azizin sabrı ve ustalıklı bir sanatçı gözüyle- metni süsleyen şekilleri yarattı. Andrew Hansın ve Jim Sethna'ya da özel bazı şekillerin hazırlanmasındaki yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Kitaptaki çeşitli konularda benimle söyleşi yapıp kişisel görüşlerini aktarmayı kabul eden Howard Georgi, Sheldon Glashow, Michael Green, John Schwarz, John Wheeler, Edward Witten ve yine Andrew Strominger, Cumrun Vafa, Gabriele Veneziano'ya da teşekkürlerimi sunuyorum.

W. W. Norton'daki editörlerime, Angela Von der Lippe'ye derinlikli görüşleri ve değerli tavsiyeleri için, Traci Nagle'ye de ayrıntılara duyarlılığı için teşekkürlerimi sunmaktan mutluluk duyuyorum. Her ikisi de sunumun açıklığına önemli katkılarda bulundu. Edebi ajanlarım John Brockman ile Katinka Matson'a da, yazılmaya başlamasından yayınlanma aşamasına dek kitabın geçtiği süreçleri uzman kılavuzluklarıyla yönlendirdikleri için teşekkür ediyorum.

Kuramsal fizik alanındaki araştırmalarımı 15 yılı aşkın bir süredir cömertçe destekledikleri için Ulusal Bilim Vakfı'na, Alfred P. Sloan Vakfı'na ve ABD Enerji Bakanlığı'na müteşekkirim. Araştırmalarımın süpersicim kuramının uzay ve zaman kavrayışımızdaki etkisini konu

alması belki de şaşırtıcı değil, sonraki birkaç bölümde benim de dahil olma şansına eriştiğim bazı keşifleri anlattım. Okurun bu "içerden" değerlendirmeleri okumaktan keyif almasını umuyor olsam da, süpersicim kuramının geliştirilmesinde oynadığım role dair abartılı bir izlenim bırakabileceklerini de fark etmiş bulunuyorum, izninizle bu fırsattan yararlanarak, nihai bir evren kuramı oluşturma çabasının ciddi ve kararlı bir katılımcısı olmuş, dünyanın dört bir yanındaki bini aşkın fizikçiye de teşekkür ederim. Bu değerlendirmede çalışmalarından bahsedilmeyen herkesten özür diliyorum; bu yalnızca seçmiş olduğum tematik bakış açısını ve genel bir sunumun beraberinde getirdiği uzunluk kısıtlamalarını yansıtıyor.

Son olarak sarsılmaz sevgisi ve desteği için Ellen Archer'a gönülden teşekkür ediyorum. O olmasaydı bu kitap yazılamazdı.

I. Bölüm

Sicimle Bağlanmış

Buna ört bas etmek demek fazla ağır olur. Ama fizikçiler, yarım yüzyılı aşkın bir süredir -tarihteki en büyük bilimsel başarıların tam ortasındayken bile- ufukta kara bir bulutun toplandığını içten içe biliyorlardı. Soruna modern fiziğin dayandığı iki temel kaideden yola çıkarak yaklaşmakta fayda var. Biri Albert Einstein'ın, evreni en geniş ölçeklerde -yıldızları, galaksileri, galaksi kümelerini- anlamaya yönelik kuramsal bir çerçeve sunan genel görelilik kuramıdır. Diğeriyse evreni en küçük ölçeklerde, moleküller, atomlar ile daha derinlere inip elektronlar ve kuarklar gibi atomaltı parçacıklar düzeyinde kavramaya yönelik kuramsal bir çerçeve sunan kuantum mekaniğidir. Yıllar süren araştırmalar sonucu, fizikçiler her iki kuramın da öngörülerinin hemen hepsini neredeyse akıl almaz bir doğrulukla deneysel olarak doğrulamış bulunuyor. Fakat kaçınılmaz bir biçimde bu kuramsal araçlar, rahatsız edici başka bir sonuca da yol açtı: Halihazırda formüle edildikleri biçimiyle genel görelilik ile kuantum mekaniği *aynı anda doğru olamaz.* Geçen yüzyıl içinde fizikte kaydedilen muazzam ilerlemenin -göklerin genişlemesini ve maddenin temel yapısını açıklayan ilerlemenin- temelinde yatan bu iki kuram birbirine uymaz.

Bu feci karşıtlığı önceden incelemediyseniz, neden böyle diye merak ediyor olabilirsiniz. Cevap pek de zor değil. En uç durumlar hariç, fizikçiler ya küçük ve hafif (atomlar ve bileşenleri gibi) ya da büyük ve ağır (yıldızlar ve galaksiler gibi) şeyler üzerinde çalışırlar, aynı anda her ikisinin de üzerinde çalışmazlar. Bu dayayalnızca kuantum mekaniğini ya dayalnızca genel göreliliği kullanmaları gerektiği, diğerinin uyarı ikazlarına şöyle kaçamak bir bakış atıp omuz silkebildikleri anlamına geliyor. Elli yıldır, bu yaklaşım cehalet kadar neşe dolu olmadı, fakat ona epeyce yaklaştı.

Fakat evren, uçlarda *olabilir.* Bir kara deliğin merkezindeki derinliklerde, muazzam bir kütle çok çok küçük boyutlara iner. Büyük Patlama sırasında evren, yanında bir kum tanesinin dev gibi kaldığı mikroskobik boyutlarda bir kütleden doğmuştu. Bunlar küçük, fakat inanılmaz derecede kütleli alanlardır, dolayısıyla hem genel göreliliğin hem kuantum mekaniğinin eş zamanlı olarak devreye girmesini gerektirirler. İlerledikçe giderek açıklık kazanacak sebeplerden ötürü, genel görelilik ile kuantum mekaniği denklemleri birleştiklerinde, su kaynatmış bir otomobil gibi sarsılır, takırdar, buharlar çıkarır. Bu kadar süslemeden söyleyecek olursak, iyi kurgulanmış fizik soruları, bu iki kuramın mutsuz birleşmesinden saçma cevaplar çıkmasına neden olur. Kara deliklerin derinliklerini ve evrenin başlangıcını bir gizem perdesinin ardında tutmak istiyor olsanız da, kuantum mekaniği ile genel görelilik arasındaki karşıtlığın daha derin bir anlayış beklediğini hissetmekten kendinizi alamazsınız. Evren gerçekten de en temelden bölünmüş; şeyler büyük olduğunda başka yasaları, küçük olduğunda başka yasaları gerektiriyor olabilir mi?

Kuantum mekaniği ile genel göreliliğin saygıdeğer yapıları ile kıyaslandığında genç biryapı olarak karşımıza çıkan süpersicim kuramı, yankılanan bir hayırla cevap veriyor bu soruya. Tüm dünyada fizikçiler ile matematikçilerin son on yıl içinde yaptığı yoğun araştırmalar, maddeyi en temel düzeyde betimleyen bu yeni yaklaşımın genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki gerilimi çözdüğünü ortaya koyuyor. Aslına bakarsanız süpersicim kuramı daha da fazlasını gösteriyor. Bu yeni çerçevede, kuramın anlamlı olabilmesi için genel görelilik ile kuantum mekaniği *birbirini tamamlıyor.* Süpersicim kuramına göre, büyük olana dair yasalarla küçük olana dair yasaların evliliği yalnızca mutlu değil, aynı zamanda kaçınılmaz bir birlikteliktir.

Bu iyi haberin bir kısmı. Süpersicim kuramı -kısaca sicim kuramı- bu birlikteliği dev bir adım daha öteye taşıyor. Einstein otuz yıl boyunca birleşik bir fizik kuramı, doğanın bütün kuvvetleri ile maddi bileşenlerini tek bir kuramsal dokumada birleştirecek bir kuram arayıp durdu. Bulmayı başaramadı. Bugün, yeni binyılın şafağında,

sicim kuramı yandaşları bu ele geçmez, bütünlüklü dokumanın ipliklerinin nihayet ortaya çıkarıldığını iddia ediyor. Sicim kuramı, evrendeki bütün mucizevi olayların -atomaltı kuarkların çılgın dansından, birbirlerinin etrafında dönen çift yıldız sistemlerinin gösterişli valsine, Büyük Patlama'nın ilk ateş topundan göklerdeki galaksilerin muhteşem girdabına varıncaya dek- hepsinin, tek bir büyük fiziksel ilkenin, tek bir temel denklemin yansımaları olduğunu gösteriyor.

Sicim kuramının bu özellikleri uzay, zaman ve madde anlayışımızı ciddi biçimde değiştirmemizi gerektirdiğinden, bunlara alışmak, rahatça sindirebilir hale gelmek biraz zaman alacak. Fakat, bağlamına yerleştirildiğinde açıklık kazanacağı üzere, sicim kuramı, fizik alanında son yüzyılda yapılmış devrimci keşiflerin ciddi ve doğal bir ürünü olarak beliriyor. Aslına bakarsanız genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki çatışmanın da, geçen yüzyılda karşı karşıya kalman, çözümleri evreni kavrayışımızın hayret verici bir biçimde değişmesiyle sonuçlanan temel çatışmalar dizisindeki ilk değil üçüncü çatışma olduğunu da göreceğiz.

Üç Çatışma

1800'lerin sonu gibi uzak bir tarihte görebildiğimiz ilk çatışma, ışığın hareketinde görülen şaşırtıcı özelliklerle ilgiliydi. Kısaca şöyle açıklayabiliriz: Isaac Newton'un hareket yasalarına göre, yeterince hızlı koşarsanız hareket halindeki bir ışık demetine yetişebilirsiniz; James Clerk Maxwell'in elektromanyetizma yasalarına göreyse yetişemezsiniz. II. Bölüm'de tartışacağımız üzere Einstein bu çatışmayı özel görelilik kuramıyla çözdü, bunu yaparken de uzay ve zaman anlayışımızı tümüyle alt üst etti. Özel göreliliğe göre, uzay ve zaman artık değişmeyen, herkesin aynı şekilde deneyimlediği evrensel kavramlar olarak düşünülemez. Einstein'ın yeniden işlediği biçimiyle uzay ve zaman, biçimleri ve görünümleri insanın hareket haline bağlı olan şekillenebilir yapılar olarak karşımıza çıkar.

Özel göreliliğin geliştirilmesi, çok geçmeden ikinci çatışmaya zemin hazırlamıştır. Einstein'ın çalışmasından çıkan sonuçlardan biri

şuydu: Hiçbir nesne -aslına bakarsanız olumlu ya da olumsuz hiçbir etkiyle- ışık hızından daha hızlı yol alamaz. Fakat III. Bölüm'de de tartışacağımız gibi, Newton'un deneysel olarak başarılı olmuş ve sezgisel olarak hoşa giden evrensel kütleçekimi kuramı, etkilerin uzayda geniş mesafelerde *anında* aktarılmasını gerektiriyordu. 1915'te ortaya koyduğu genel görelilik kuramıyla yeni bir kütleçekimi kavrayışı sunarak devreye girip çatışmayı çözen yine Einstein oldu. Özel göreliliğin daha önceki uzay ve zaman kavrayışlarını alt üst etmesinde olduğu gibi, bu kez de genel görelilik, önceki uzay ve zaman kavrayışını alt üst etti. Uzay ve zaman, hareketlilik durumundan etkilenmekle kalmıyor, madde ya da enerjinin varlığına bağlı olarak yamulabiliyor ve eğrilebiliyordu. Uzay ve zamanın dokusundaki bu tür çarpılmalar göreceğimiz üzere kütleçekimi kuvvetini bir yerden diğerine aktarıyordu. Dolayısıyla uzay ve zaman artık, üzerinde evrendeki olayların gerçekleştiği atıl bir zemin olarak düşünülemeyecekti; aksine özel ve sonra da genel görelilik kuramlarıyla birlikte olayların içindeki oyuncular haline gelmişlerdi.

Sahne bir kez daha baştan alındı: Genel göreliliğin keşfi bir çatışmayı çözerken bir diğerine yol açtı. 1900'den beri 30 yıldır, fizikçiler, 19. yüzyılın fizik kavrayışlarının mikroskobik dünyaya uygulanması halinde baş gösteren birtakım belirgin sorunlara cevaben kuantum mekaniğini (IV. Bölüm'de tartışacağız) geliştirmekteydi. Yukarıda da belirttiğimiz gibi, üçüncü ve en derin çatışma, kuantum mekaniğiyle genel görelilik arasındaki uyumsuzluktan doğdu. V. Bölüm'de de göreceğimiz üzere, genel göreliliğin ortaya koyduğu uzayın yumuşak kıvrımlı geometrik biçimi, kuantum mekaniğinin anlattığı, evrenin çılgın, bulanık, mikroskobik davranış biçimiyle sürekli bir uyumsuzluk içindedir. Sicim kuramının bir çözüm önerdiği 1980'lerin ortalarına dek, bu çatışma haklı olarak modern fiziğin ana sorunu olarak nitelenmiştir. Dahası, özel ve genel göreliliğin üzerine kurulan sicim kuramı da, uzay ve zaman kavrayışlarımızın ciddi biçimde yenilenmesini gerektirmiştir. Örneğin birçoğumuz evrenimizin üç uzamsal boyutu olduğunu kabul ederiz. Fakat sicim kuramına göre durum böyle değildir; sicim kuramı evrenimizin gözle görülenlerden daha fazla boyuta -kozmosun katlanmış dokusu içinde sıkıca kıvrılmış boyutlara- sahip olduğunu

öne sürer. Uzay ve zamanın doğasıyla ilgili bu dikkat çekici görüşler o kadar merkezi bir önem taşır ki, bundan sonra söyleyeceğimiz her şeyde bunları kılavuz tema olarak kullanacağız. Sicim kuramı, gerçekten de, Einstein'dan bu yana uzay ve zamanın hikâyesidir.

Sicim kuramının aslında ne olduğunu takdir edebilmek için, bir adım geri atıp geçen yüzyılda evrenin mikroskobik yapısına dair ne öğrenmiş olduğumuzu kısaca betimlememiz gerekiyor.

En Küçük Haliyle Evren: Madde Hakkında Bildiklerimiz

Eski Yunanlılar, evrendeki her şeyin atom dedikleri, küçük, "bölünemez" bileşenlerden yapıldığını varsaymışlardı. Alfabe kullanılan bir dilde, muazzam sayıda sözcüğün, az sayıda harfle oluşturulmuş zengin kombinasyonlardan meydana gelmiş olması gibi, engin bir varlık gösteren maddi nesnelerin de az sayıdaki ayrı, temel yapıtaşlarından oluşmuş kombinasyonlar olabileceği tahmininde bulunmuşlardı. İleriyi gören bir tahmin olmuş bu. En temel birimlerin kimliği, sayılamayacak kadar çok değişiklikten geçmiş olsa da, 2000 yıl sonra hâlâ bunun doğru olduğuna inanıyoruz. 19. yüzyılda bilim insanları oksijen ve karbon gibi tanıdık maddelerin birçoğunun tanınabilir, en küçük bir bileşeni olduğunu gösterdi; Yunanlıların geleneğine uyarak bu bileşene atom dediler. İsim tuttu, ama tarih bunun yanlış bir isimlendirme olduğunu gösterdi, zira atomlar tabi ki "bölünebiliyordu." 1930ların başında J. J. Thomson, Ernest Rutherford, Niels Bohr ve James Chadwick'in kolektif çalışmalarıyla birlikte, hepimizin aşina olduğu Güneş sistemine benzer bir atom modeli geliştirildi. Atomlar maddenin en temel bileşeni olmak şöyle dursun, yörüngede dönen elektronlarla çevrelenmiş protonlar ve nötronlar içeren bir çekirdek taşıyordu.

Bir süre, birçok fizikçi protonlar, nötronlar ve elektronların Yunanlıların "atomları" olduğunu düşündü. Fakat 1968'de, Stanford Doğrusal Elızlandırıcı Merkezi'ndeki araştırmacılar, teknolojinin artan kapasitesinden yararlanarak maddenin mikroskobik derinliklerini araştırırken, protonlar ve nötronların da temel bileşenler olmadığını gördüler. Aksine her birinin *kuark* denilen -daha önceden bu

parçacıkların varlığını varsayan kuramsal fizikçi Murray Gell-Man'in James Joyce'un *Finnegan's Wake* adlı romanındaki pasajdan aldığı mizahi bir isimdi bu- daha küçük üç parçadan daha oluştuğunu gösterdiler. Deneyi gerçekleştirenler kuarkların da iki çeşit olduğunu doğruladı; bunlara pek o kadar yaratıcılığa kaçılmadan *yukarı* kuarklar ve *aşağı* kuarklar dendi. Bir proton iki yukarı kuarkla, bir aşağı kuarktan oluşur; bir nötronsa iki aşağı kuarkla bir yukarı kuarktan.

Maddelerin dünyasında ve yukarıda göklerde gördüğünüz her şey, elektron, yukarı kuark ve aşağı kuark kombinasyonlarından oluşur. Bu üç parçacığın daha küçük bir şeylerden yapıldığını gösteren deneysel bir kanıt yoktur. Fakat birçok kanıt, evrenin parçacık türü başka bileşenleri olduğunu göstermektedir. 1950'lerin ortalarında Frederick Reines ve Clyde Cowan *nötrino* denilen dördüncü bir tür temel parçacığın varlığına dair kesin deneysel kanıtlar buldular; 1930'ların başında Wolfgang Pauli tarafından varlığı tahmin edilen bir parçacıktı bu. Nötrinoları bulmak çok güç oldu, çünkü bunlar başka maddelerle nadiren etkileşime geçen hayaletsi parçacıklardır: Ortalama düzeyde enerjiye sahip bir nötrino, trilyonlarca kilometre kurşunun içinden, onun hareketini bir nebze olsun etkilemeksizin kolayca geçip gidebilir. Bu sizi epeyce rahatlatmalı, çünkü siz bu satırları okurken, Güneş'in uzaya saldığı milyarlarca nötrino, kozmostaki yalnız seyahatlerini sürdürürken, vücudunuzdan ve yerkürenin içinden geçip gidiyor. 1930'ların sonunda, kozmik ışınlar (dış uzaydan Dünyaya yağan parçacık yağmurları) üzerine çalışmakta olan fizikçiler *müon* denilen başka bir parçacık keşfetti. Kozmik düzende müonun varlığını gerektiren hiçbir şey, çözülmemiş bir bilmece, hazır edilmiş bir yer olmadığından, Nobel Ödüllü parçacık fizikçisi Isidor Isaac Rabi müonun keşfini hiç de şevkli olmayan "Bunu da kim sipariş etti?" sözleriyle karşılamıştı. Ama ne yaparsınız vardı işte. Arkası da gelecekti.

Daha da güçlü bir teknoloji kullanan fizikçiler, madde parçacıklarını giderek artan bir enerjiyle çarpıştırmayı, Büyük Patlama'dan buyana hiç görülmemiş koşulları bir anlığına yaratmayı sürdürdü. Enkazın içinde, giderek uzayan parçacık listesine

ekleyecek yeni temel parçacıklar arıyorlardı. İşte şunları buldular: Dört kuark daha -çekici, tuhaf, alt ve üst kuarklar- elektronun *tau* denilen daha ağır bir kuzeni, ayrıca nötrinoya benzer özellikler gösteren başka iki parçacık daha (bugün *elektron-nötrino* denilen özgün nötrinoyla karıştırılmamaları için bunlara *müon-nötrino* ve *tau-nötrino* denmiştir). Bu parçacıklar büyük enerji patlamalarıyla oluşturulmuşlardır ve ancak geçici bir ömürleri vardır: Genelde karşılaştığımız hiçbir şeyin bileşeni değillerdir. Fakat hikâye burada bitmiyor. Bu parçacıkların her birinin bir *karşı parçacık* partneri vardır; benzer kütleye sahip, fakat elektrik yükü (ayrıca aşağıda tartışacağımız başka kuvvetler bakımından yükleri) gibi başka bazı bakımlardan karşıt olan bir parçacık. Örneğin bir elektronun karşı parçacığına pozitron denir; elektronla aynı kütleye sahiptir, ama elektronun elektrik yükü -1'ken onun elektrik yükü +1'dir. Temasa geçtiklerinde madde ve karşı madde birbirlerini ortadan kaldırıp saf enerji ortaya çıkarabilirler; etrafımızdaki dünyada doğal olarak mevcut son derece küçük miktarda karşı madde bulunmasının sebebi budur.

Fizikçiler bu parçacıklar arasında, Tablo 1.1'de gösterilen bir örüntü görmüşlerdi. Madde parçacıkları genellikle aile denilen üç gruba ayrılmaktadır. Her aile iki kuark, bir elektron, elektronun kuzenlerinden birini ve nötrino türlerinden birini içerir. Bu üç ailede, benzer tipte parçacıklar benzer özellikler gösterirler, kütleleri dışında; kütlelerinin büyüklüğü aile sıralamasına göre artar. Netice itibarıyla, fizikçiler bugün maddenin yapısını, metrenin milyarda birinin milyarda biri ölçeğinde araştırmışlar ve bugüne kadar karşılaşdan her şeyin -ister doğal olarak mevcut olsun, ister devasa atom çarpıştırıcılarda yapay olarak üretilmiş olsun- bu üç ailede yer alan parçacıkların ve onların karşı madde partnerlerinin bir kombinasyonundan oluştuğunu göstermiştir.

1.Aile		2. Aile		3. Aile	
Parçacık	Kütle	Parçacık	Kütle	Parçacık	Kütle
Elektron	0,00054	Müon	0,11	Tau	1,9
Elektron-nötrino	< 10-'	Müon-nötrino	< 0,0003	Tau-nötrino	< 0,033
Yukarı kuark	0,0047	Çekici kuark	1,6	Üst kuark	189
Aşağı kuark	0,0074	Tuhaf kuark	0,16	Alt kuark	5,2

Tablo 1.1 Üç temel parçacık ailesi ve bu parçacıkların kütleleri (protonun kütlesinin katlan olarak). Nötrino kütlelerinin değerleri, bugüne dek deneysel olarak belirlenememiştir.

Tablo 1.1'e şöyle bir göz gezdirdiğinizde, Rabi'nin müonun keşfi karşısındaki şaşkınlığını daha iyi anlayacaksınız kuşkusuz. Ailelerin düzenlenmesi, en azından düzenlilik benzeri bir şeyin var olduğunu gösteriyor, fakat birçok "neden" sorusu da gündeme geliyor. Neden bu kadar çok temel parçacık var, özellikle de etrafımızdaki şeylerin büyük bir çoğunluğu sadece elektronları, yukarı-kuarkları ve aşağı-kuarkları gerektiriyormuş gibi görünürken? Neden üç aile var? Neden aile sayısı bir ya da dört ya da başka bir şey değil? Neden parçacıkların kütlesel dağılımı görünüşte rasgele; örneğin taunun ağırlığı neden elektronun ağırlığının yaklaşık 3520 katı? Neden üst kuarkın ağırlığı, yukarı-kuarkın ağırlığının yaklaşık 40.200 katı? Bunlar tuhaf, görünüşte rasgele rakamlardır. Şans eseri mi mevcutturlar yoksa ilahi bir tercih yüzünden mi, yoksa evrenimizin bu temel özelliklerinin anlaşılabilir bir bilimsel açıklaması var mıdır?

Kuvvetler ya da Foton Nerede?

Doğadaki kuvvetleri düşündüğümüzde işler daha da karışıyor. Etrafımızdaki dünya etki yaratma araçlarıyla doludur: Toplara sopalarla vurulabilir, bungee meraklıları yüksek platformlardan kendilerini yere doğru bırakır, mıknatıslar süper hızlı trenleri metal rayların üzerinde tutar, Geiger sayaçları radyoaktif maddeye tepki verir, nükleer bombalar patlayabilir. Şiddetli bir biçimde iterek, çekerek ya da sarsarak; onlara başka nesneler fırlatarak ya da

ateşleyerek; çekiştirerek, bükerek ya da parçalayarak; dondurarak, ısıtarak ya da yakarak nesneleri etkileyebiliriz. Geçen yüzyıl içinde fizikçiler, çeşitli nesneler ve maddeler arasındaki bütün bu etkileşimlerin, ayrıca her gün karşılaştığımız milyonlarca etkileşimin, dört temel kuvvetin kombinasyonuna indirgenebileceği yolunda giderek artan sayıda kanıt topladı. Bu kuvvetlerden biri *kütleçekimi kuvvetidir.* Diğer üçü *elektromanyetik kuvvet, zayıf kuvvet* ve *güçlü kuvvettir.*

Kütle çekimi en tanıdık kuvvettir, bizi Güneş'in etrafında yörüngede tutar, ayrıca ayağımızın yere sağlam basmasını sağlar. Bir nesnenin kütlesi, ne kadar çekim kuvveti uygulayabileceği ve hissedebileceğiyle ölçülür. Elektromanyetik kuvvet, dört kuvvet arasında en tanıdık ikinci kuvvettir. Modern hayatın sunduğu bütün rahatlıkların -ampuller, bilgisayarlar, televizyonlar, telefonlar- itici gücüdür; ışıklar saçan fırtınalar ve bir insan elinin yumuşak dokunuşundaki tuhaf kudretin temelinde yatar. Mikroskobik olarak, bir parçacığın elektrik yükü, kütlenin kütleçekimi açısından oynadığı rolün bir benzerini elektromanyetik kuvvet açısından oynar: Bir parçacığın elektromanyetik olarak ne kadar kuvvet açığa çıkarabileceğini ve ne kadar karşılık verebileceğini belirler.

Güçlü ve zayıf kuvvetler o kadar tanıdık değildir, çünkü güçleri atomaltı mesafe ölçekleri dışında heryerde hızla azalır; bunlar nükleer kuvvetlerdir. Bu iki kuvvetin bu kadar yakın dönemde keşfedilmiş olmasının sebebi de budur. Güçlü kuvvet, kuarkların protonların ve nötronların içinde "yapışık" durmasını, protonlar ve nötronların atom çekirdekleri içinde bir arada sıkışık durmasını sağlar. Zayıf kuvvet, uranyum ve kobalt gibi maddelerin radyoaktif bozunmasından sorumlu kuvvet olarak tanınır daha çok.

Geçen yüzyıl içinde fizikçiler bütün bu kuvvetlerde ortak olan iki özellik buldular. İlki, V. Bölüm'de tartışacağımız gibi, mikroskobik düzeyde bütün kuvvetlerin kuvvetin en küçük demeti ya da paketi olarak düşünebileceğiniz birleşik bir parçacığa sahip olmasıdır. Bir lazer ışını ateşlerseniz -"elektromanyetik bir ışın tabancası"- bir *foton* akımı, elektromanyetik kuvvetin en küçük demetlerini ateşlersiniz.

Keza, zayıf ve güçlü kuvvet alanlarının en küçük bileşenleri de *zayıfayar bozonları* ile *glüonlardır.* (Glüonları atom çekirdeklerini bir arada tutan kuvvetli bir tutkalın mikroskobik bileşenleri olarak düşünebilirsiniz.) 1984'e gelindiğinde deneyciler, bu üç tür kuvvet parçacığının varlığını ve ayrıntılı özelliklerini, Tablo 1.2'de görüldüğü gibi kesinleştirmişlerdi. Fizikçiler kütleçekimi kuvvetinin de birleşik bir parçacığı -graviton- olduğuna inanıyor, fakat bu parçacığın varlığı deneysel olarak henüz doğrulanmış değildir.

Kuvvetlerin ikinci ortak özelliği şudur: Kütlenin, kütleçekimin bir parçacığı nasıl etkileyeceğini belirlemesinde, elektrik yükünün de elektromanyetik kuvvetin bir parçacığı nasıl etkileyeceğini belirlemesinde olduğu gibi, parçacıklar, güçlü ve zayıf kuvvetler tarafından nasıl etkileneceklerini belirleyen belli miktarlarda "güçlü yük" ve "zayıfyük"e sahiptir. (Bu özellikler, bu bölümün sonundaki dipnotlarda ayrıntılı olarak verilmiştir.) Fakat tıpkı parçacık kütleleri bakımından söz konusu olduğu gibi, deneysel fizikçilerin bu özellikleri titizlikle ölçmüş olması gerçeği dışında, evrenimizin neden bu özel parçacıklardan, bu özel kütlelerden ve kuvvet yüklerinden oluştuğuna, kimse bir açıklama getirebilmiş değildir.

Ortak özellikleri bir tarafa, sadece temel kuvvetlerin incelenmesi bile yalnızca soruların ağırlığını artırıyor. Örneğin neden dört temel kuvvet var? Neden beş ya da üç ya da belki de yalnızca bir kuvvet yok? Neden kuvvetlerin böyle farklı özellikleri var? Neden güçlü kuvvetle zayıf kuvvetin etkisi mikroskobik ölçeklerle sınırlıyken, kütleçekimi ile elektromanyetik kuvvetin sınırsız bir etki alanı var? Neden bu kuvvetlerin içkin gücünde böyle muazzam bir yayılma var?

Kuvvet	Kuvvet parçacığı	Kütle
Güçlü	Glüon	0
Elektromanyetik	Foton	0
Zayıf	Zayıf ayar bozonları	86,97
Kütleçekim	Graviton	0

Tablo 1.2 Doğadaki dört kuvvet, bunlarla ilişkili kuvvet parçacıkları ve bu parçacıkların proton kütlesinin katları olarak kütleleri. (Zayıf kuvvet parçacıkları çok çeşitlidir, iki olası kütle sıralanmıştır.

Kuramsal incelemeler gravitonun da kütlesiz olması gerektiğini göstermektedir.)

Bu son soruyu değerlendirebilmek için sol elinizde bir elektron, sağ elinizde bir başka elektron tuttuğunuzu, benzer elektrik yüküne sahip bu parçacıkları bir araya getirdiğinizi düşünün. Karşılıklı kütle çekimleri yaklaşmalarını desteklerken, elektromanyetik iticilikleri de onları ayırmaya çalışacaktır. Hangisi daha güçlüdür? Burada yarışa yer yoktur: Elektromanyetik itiş 10^{42} kere daha kuvvetlidir! Sağ kolunuz kütleçekimi kuvvetinin gücünü temsil ediyorsa, sol kolunuzun elektromanyetik kuvvetin gücünü temsil edebilmek için bilinen evrenin kıyısının ötelerine ulaşması gerekir. Etrafımızdaki dünyada, elektromanyetik kuvvetin kütleçekimi tümüyle aşmamasının tek sebebi, çoğu şeyin eşit miktarda pozitif ve negatif elektrikle yüklü olması, bu yüklerin kuvvetlerinin birbirini iptal etmesidir. Öte yandan kütleçekimi her zaman çeken bir kuvvet olduğundan, benzer bir iptal söz konusu değildir; daha fazla şey daha büyük bir kütle çekim kuvveti anlamına gelir. Fakat esasen, kütleçekimi son derece zayıf bir kuvvettir. (Graviton'un varlığını deneysel olarak doğrulamanın güçlüğü bu olguyla açıklanır. En zayıf kuvvetin en küçük demetini aramak hayli zor bir iştir.) Deneyler güçlü kuvvetin elektromanyetik kuvvetten yüz kat, zayıf kuvvetten de yüz bin kat daha güçlü olduğunu göstermiştir. Peki, evrenimizin bu özelliklere sahip olmasının mantığı nerededir?

Bazı ayrıntıların neden şöyle değil de böyle olduğu üzerine aylak aylak felsefe yapmaktan ileri gelen bir soru değildir bu; maddenin ve kuvvet parçacıklarının özellikleri bir parça bile değiştirilseydi, evren çok farklı biryer olurdu. Örneğin periyodik tablodaki yüz kadar elementi oluşturan kararlı çekirdeklerin varlığı, güçlü kuvvetle elektromanyetik kuvvetin güçleri arasındaki hassas orana dayanır. Atom çekirdeklerinin içindeki protonların hepsi de birbirini elektromanyetik olarak iter; protonların bileşeni olan kuarkları etkileyen güçlü kuvvet, şükürler olsun ki, bu itkiyi yener ve protonları sıkıca bir arada tutar. Fakat bu kuvvetlerin göreli güçlerindeki küçücük bir değişiklik bile aralarındaki dengeyi kolayca bozacak ve atom çekirdeklerinin çoğunun çözülmesine yol açacaktır. Dahası

elektronun kütlesi, olduğundan birkaç kat daha büyük olsaydı, elektronlar ve protonlar nötronlar oluşturma eğiliminde olurlar, hidrojen (evrendeki en basit elementtir ve tek bir protona sahip tek çekirdeği vardır) çekirdeklerini yutarlar, böylece daha karmaşık elementlerin ortaya çıkmasını engellerlerdi. Yıldızlar, kararlı çekirdekler arasındaki füzyona dayanır ve oluşumları da temel fizik koşulları açısından değişik durumlar oluşturmaz. Kütle çekimi kuvvetinin gücü yıldızların oluşumunda da rol oynar. Biryıldızın merkezinde bulunan çekirdekteki maddenin ezici yoğunluğu, yıldızın nükleer ocağını besler ve sonuçta oluşan yıldız ışığına yol açar. Kütle çekimi kuvvetinin gücü artsaydı, yıldız kümelenmesi daha sıkı bir biçimde birbirine bağlanır, bu da nükleer tepkimelerin oranında ciddi bir artışa neden olurdu. Fakat tıpkı parlak bir alevin yakıtını, ağır ağır yanan bir muma nazaran daha hızlı tüketmesinde olduğu gibi, nükleer tepkime oranındaki bir artış da Güneş gibi yıldızların daha hızlı yanıp tükenmesine yol açardı ki, bunun da bildiğimiz biçimiyle hayatın oluşumu üzerinde yıkıcı bir etkisi olurdu. Öte yandan kütleçekimi kuvvetinin gücü azalsaydı, madde bir arada kümelenmezdi, bu da yıldızların ve galaksilerin oluşumunu engellerdi.

Devam edebiliriz, fakat fikir gayet açıktır: Evren olduğu gibidir çünkü madde ve kuvvet parçacıkları sahip oldukları özelliklere sahiptir. Peki, *neden* bu özelliklere sahip olduklarının bilimsel bir açıklaması var mıdır?

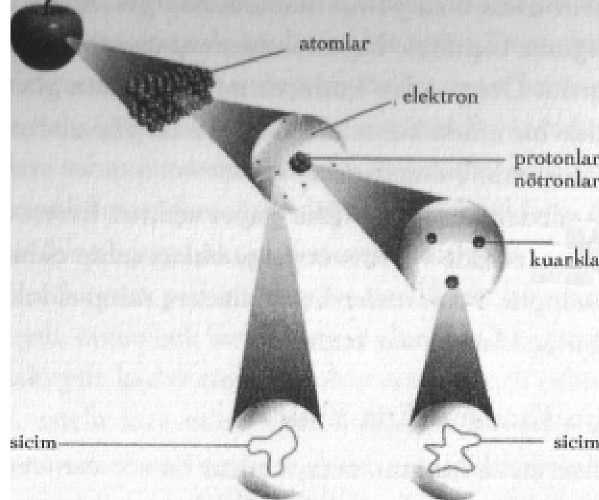
Sicim Kuramı: Ana Fikir

İlk kez sicim kuramı, ortaya çıkan bu soruları cevaplamaya yönelik güçlü bir kavramsal değerler dizisi sunmuştur. Ama önce ana fikri kapalım.

Tablo 1.1'deki parçacıklar maddenin "harfleri"dir. Dildeki karşılıkları gibi onların da başka bir içyapısı yoktur. Oysa sicim kuramı aksini iddia ediyor. Sicim kuramına göre, bu parçacıkları daha büyük bir kesinlikle -bugünkü teknolojik kapasitemizin ötesine geçen bir ölçekte- inceleyebilecek olsaydık, nokta gibi olmadıklarını, aksine tek

boyutlu küçük bir ilmekten oluştuğunu görürdük. Parçacıkların her birinde, sonsuz derecede ince lastik bir banta benzeyen ve titreşen, salman, dans eden bir tel vardır; Gell-Mann'ın edebi zevkinden yoksun fizikçiler buna *sicim* demişlerdir. Şekil 1.1'de sicim kuramının bu temel fikrini, sıradan bir maddeden, elmadan başlayarak, daha küçük boyutlardaki bileşenlerini ortaya koyabilmek için elmanın yapısını her seferinde büyüterek resmettik. Sicim kuramı, atomlardan protonlara, nötronlara, elektronlara ve kuarklara uzanan, bilinen sıralamaya, mikroskobik düzeyde yer alan titreşen bir ilmek eklemiştir.

Bu, şu anda sizin için çok açık olmasa da, VI. Bölüm'de madde bileşenlerinin noktasal parçacıklar yerine sicimler olarak görülmesinin kuantum mekaniğiyle genel görelilik arasındaki uyumsuzluğu çözdüğünü göreceğiz. Sicim kuramı böylece çağdaş kuramsal fiziğin Gordiyon düğümünü çözmüştür. Bu muazzam bir başarıdır, fakat sicim kuramının böyle büyük bir heyecan yaratmasının gerisindeki sebeplerden biridir yalnızca.



Şekil 1.1 Madde atomlardan oluşur, atomlar da kuarklar ve elektronlardan. Sicim kuramına göre, bütün bu parçacıklar aslında titreşen küçük sicim ilmekleridir.

Her Şeyin Birleşik Bir Kuramı Olarak Sicim Kuramı

Einstein'ın zamanında, güçlü ve zayıf kuvvetler henüz keşfedilmemişti, fakat Einstein iki farklı kuvvetin varlığını -kütle çekimi ile elektromanyetizma- oldukça sorunlu bulmuştu. Doğanın böyle abartılı bir tasarıma dayandığını kabul etmemişti. Bu yüzden de, bu iki kuvvetin aslında tek bir büyük temel ilkenin tezahürü olduğunu göstereceğini umduğu birleşik bir alan kuramı arayışına girmişti, bu arayışı 30 yıl sürecekti. Bu Don Kişot'unkine benzeyen arayış Einstein'ı, yeni yeni doğmakta olan kuantum mekaniğinin çerçevesine dalma konusunda gayet anlaşılır bir heyecan duyan ana akım fizikten ayırdı. 1940'ların başında bir dostuna, "Aslına bakarsan, çorap giymemekle tanınan, özel bazı durumlarda ilginç bir vaka olarak sergilenen yalnız bir ihtiyar olup çıktım," diyecekti.

Einstein zamanının ilerisindeydi. Yarım yüzyılı aşkın bir süre sonra, birleşik bir kuram hayali modern fiziğin Kutsal Kâsesi olup çıkacaktı. Bugün fizik ve matematik çevrelerinin hatırı sayılır bir kesimi sicim kuramının bir cevap sunabileceğine giderek daha çok ikna olmaktadır. Sicim kuramı, tek bir ilkeden -en ileri mikroskobik düzeyde her şeyin titreşen tellerin bileşimlerinden oluştuğu ilkesi-bütün kuvvetleri ve bütün maddeyi içerebilen açıklayıcı tek bir çerçeve oluşturur.

Sicim kuramı, parçacıklarda gözlenen özelliklerin, Tablo 1.1 ile 1.2'de özetlenen verilerin, bir sicimin çok çeşitli titreşme biçimlerinin bir yansıması olduğunu iddia eder. Nasıl bir keman ya da bir piyanodaki tellerin titreşmeyi tercih ettiği yankı frekansları -kulaklarımızın çeşitli müzik notaları ve onların armonileri olarak duyduğu örüntüler- varsa aynı şey, sicim kuramındaki ilmekler için de geçerlidir. Fakat sicim kuramında, bir sicimin tercih ettiği titreşim örüntülerinin, müzik notaları ortaya çıkarmak yerine, kütlesi ve kuvvet yükü sicimin salınım örüntüsüyle belirlenen bir parçacık olarak göründüğünü ilerde göreceğiz. Elektron, bir biçimde titreşen bir sicimdir, yukarı kuark başka bir biçimde titreşen bir sicim vs. Sicim kuramında parçacıkların özellikleri kaotik deneysel olgular olmak değildir. Aslında tek bir fiziksel özelliğin tezahürleridir, yani temel sicim demetlerinin titreşimlerinin, müziğin, yankı örüntülerinin tezahürleridir. Aynı fikir doğadaki kuvvetler için de geçerlidir. Kuvvet

parçacıklarının da belli sicim titreşim örüntüleriyle ilişkili olduğunu, dolayısıyla her şeyin, bütün maddenin ve bütün kuvvetlerin mikroskobik sicim salınışları -sicimlerin çaldığı "notalar"- başlığı altında birleştiğini göreceğiz.

Böylece fizik tarihinde ilk kez evrenin yapısının dayandığı bütün temel özellikleri açıklama kapasitesine sahip bir çerçeve oluyor elimizde. Bu yüzden de sicim kuramı kimi zaman "her şeyin kuramı" ya da "nihai", "son" kuram olarak tanımlanır. Bu şaşaalı betimleyici terimler, kuramın mümkün olan en derin fizik kuramı olduğunu ifade etmeyi amaçlar; başka bütün kuramların temelindeki bir kuram, daha derin bir açıklayıcı dayanağı gerektirmeyen, hatta bunu olanaksız kılan bir kuram. Pratikte, sicim kuramcılarının birçoğu daha makul bir yaklaşımı benimser ve daha sınırlı bir anlamda, temel parçacıkların ve onların etkileşime girdiği, birbirini etkileyebilen kuvvetlerin özelliklerini açıklayabilen bir kuram olması anlamında "her şeyi kapsayan bir kuramdan bahsederler. Sıkı bir indirgemeci bunun aslında hiçbir biçimde bir sınırlama olmadığını, prensip itibarıyla Büyük Pat-lama'dan gözümüz açık daldığımız rüyalara dek her şeyin maddenin temel bileşenlerini içeren, temel mikroskobik fiziksel süreçlerle açıklanabileceğini öne sürecektir. Bileşenler hakkında her şeyi anlıyorsanız, der indirgemeci, her şeyi anlarsınız.

İndirgemeci felsefe, ateşli bir tartışmayı kolayca yangına çevirebilir. Birçok kişi, hayatın ve evrenin mucizelerinin, mikroskobik parçacıkların yaptığı, koreografisi tümüyle fizik yasalarına ait amaçsız bir dansın yansımalarından ibaret olduğu iddiasını ahmakça ve baştan aşağı çirkin bulur. Neşe, üzüntü, sıkıntı duyguları gerçekten de beyindeki kimyasal tepkimelerden -moleküller ve atomlar, daha da mikroskobik düzeyde bakınca, gerçekten de titreşen sicimlerden ibaret olan, Tablo 1.1'deki bazı parçacıklar arasındaki tepkimelerden- başka bir şey değil midir? Nobel Ödüllü Steven Weinberg *Dreams of a Final Theory* adlı kitabında bu eleştiri çizgisine cevaben şu uyarıda bulunuyor:

Yelpazenin diğer ucundaysa, modern bilimin sıkıcılığı olarak gördükleri şey karşısında hayrete düşen indirgemecilik karşıtları yer

alır. Kendilerinin ve dünyalarının, parçacıklar ya da alanlar ile bu parçacıklar arasındaki etkileşimler meselesine indirgenebilmesi karşısında bu bilgiyle kendilerini eksilmiş hissederler... Bu tür eleştirileri yapanlara modern bilimin güzelliklerine dair moral verici bir konuşmayla cevap vermeye çalışmayacağım. İndirgemeci dünya görüşü ürkütücü ve gayri şahsidir. Olduğu haliyle kabul edilmesi gerekir, sevdiğimiz için değil, dünya böyle işlediği için.

Bazıları bu keskin görüşe katılır, bazıları katılmaz.

Başka bazıları ise kaos kuramı gibi gelişmelerin, bir sistemdeki karmaşıklık düzeyi arttıkça yeni tür yasaların işlemeye başladığını savunur. Bir elektronun ya da kuarkın davranış biçimini anlamak bir şeydir; bu bilgiyi bir hortumun davranış biçimini anlamak için kullanmak ise bambaşka bir şeydir. Bu noktada çoğu kişi hemfikirdir. Fakat tek tek parçacıklardan daha karmaşık olan sistemlerde ortaya çıkabilen çok çeşitli ve genelde beklenmedik olguların gerçekten yeni prensiplerin devreye girdiğini mi gösterdiği, yoksa bu olguların gerisindeki prensiplerin son derece karmaşık bir biçimde de olsa muazzam sayıda temel parçacığı yöneten fiziksel ilkelere dayanan, onların türevi olan prensipler mi olduğu konusunda fikir ayrılıkları mevcuttur. Ben bu prensiplerin yeni ve bağımsız fizik yasalarını temsil etmediğini düşünüyorum. Bir hortumun özelliklerini elektron ya da kuarkların fiziğiyle açıklamak zor olsa da, ben bunu hesaplarla ilgili bir çıkmaz olarak görüyorum, yeni fiziksel yasalara ihtiyaç olduğunun bir göstergesi olarak değil. Fakatyine, bu görüşe katılmayanlar da var.

Sorgulamaların büyük ölçüde ötesinde olan ve bu kitapta betimlenen yolculuk açısından asıl önemli olan şey şudur: Katı indirgemecinin tartışmalı akıl yürütmesini kabul etsek dahi, prensip bir şeydir, uygulama tümüyle başka bir şey. "Her şeyi kapsayan kuram"ı bulmuş olmanın hiçbir biçimde, psikoloji, biyoloji, jeoloji, kimya, hatta fiziğin çözüldüğü, yani bir anlamda sınırlandırıldığı anlamına gelmediği konusunda neredeyse herkes hemfikirdir. Evren öyle muhteşem bir zenginliğe sahip, öyle karmaşık bir yerdir ki, burada betimlediğimiz anlamda nihai kuramın keşfi, bilimin sonu

anlamına gelmeyecektir. Tam tersine: Her şeyin kuramının -evrenin mikroskobik olarak en ileri düzeydeki nihai açıklaması, daha derin bir açıklamaya dayanmayan bir kuram- keşfi, dünyaya dair anlayışımızı üzerine *inşa edeceğimiz* en sağlam temeli oluşturacaktır. Bu kuramın keşfi bir son değil, bir başlangıç olacaktır. Nihai kuram, evrenin anlaşılabilir bir yer olduğu yönünde bizi ebediyen temin edecek sarsılmaz tutarlılıkta bir temel sunacaktır.

Sicim Kuramının Durumu

Bu kitabın temel kaygısı, sicim kuramına göre evrenin işleyişini açıklamaktır, bunu yaparken asıl ağırlığı kuramın vardığı sonuçların uzay ve zamanı kavrayışımız üzerindeki etkilerine vereceğim. Bilimsel gelişmelerle ilgili başka birçok açıklamanın tersine, burada sunulacak açıklama, tümüyle oturtulmuş, birçok deneysel testle doğrulanmış, bilimsel çevre tarafından tam anlamıyla kabul edilmiş bir kuramı ele almaz. Sonraki bölümlerde de tartışacağımız üzere bunun sebebi şudur: Son yirmiyılda kaydedilen etkileyici ilerlemelere rağmen, sicim kuramı öyle derin, öyle incelikli bir kuramsal yapıdır ki kurama tam anlamıyla hâkim olduğumuzu iddia edebilmemiz için daha epeyce yol kat etmemiz gerekiyor.

Bu yüzden de sicim kuramı, tamamlanmış kısımlarıyla uzay, zaman ve maddenin derinliklerine dair şaşırtıcı kavrayışlar ortaya çıkarmış, hâlâ geliştirilmekte olan bir çalışma olarak görülmelidir. Genel görelilik ile kuantum mekaniğinin uyumlu bir biçimde bir araya getirilmesi büyük bir başarıdır. Dahası sicim kuramı, doğanın en temel bileşenleri ve kuvvetleriyle ilgili esas sorulara cevap verme kapasitesine sahiptir. Aktarması daha güç olsa da, sicim kuramının ortaya attığı cevapların ve bu cevapları oturttuğu çerçevenin dikkat çekici bir zarafete sahip olması da aynı derecede önemlidir. Söz gelimi sicim kuramına göre, doğanın, yapay teknik ayrıntılar olarak görünebilecek birçok yönünün -örneğin, ayrı temel parçacık bileşenlerinin sayısı ve özellikleri gibi- evrenin geometrisinin temel ve somut veçhelerinden kaynaklandığı görülmektedir. Sicim kuramı doğruysa eğer, evrenimizin mikroskobik dokusu, evrendeki sicimlerin sonu gelmez bükülmeler ve titreşimlerle kozmik yasaları ritmik olarak

ifade ettiği, iç içe geçmiş birçok boyuttan oluşan zengin bir labirenttir. Doğanın temel yapıtaşlarının özellikleri tesadüfi ayrıntılar olmak şöyle dursun, uzay ve zamanın dokusuna derinden sarılmıştır.

Gerçi son kertede, sicim kuramının evrenimizin en derin gerçeklerini örten gizem perdesini gerçekten kaldırıp kaldırmadığını belirleyebilecek eksiksiz, sınanabilir tahminlerin yerini hiçbir şey alamaz. Anlayış düzeyimizin bu amaca ulaşabilecek derinliği kazanması zaman alabilir, fakat IX. Bölüm'de de tartışacağımız gibi, deneysel testler gelecek on yıl içinde sicim kuramına güçlü, ayrıntılı bir destek kazandırabilir. Ayrıca XIII. Bölüm'de, sicim kuramının yakın dönemde kara deliklerle ilgili, yaygın deyişle Bekenstein-Hawking entropisiyle ilişkilendirilen, daha bildik, alışıldık yöntemlerle çözülmeye 25 yılı aşkın bir süredir inatla direnen temel bir bulmacayı da çözdüğünü göreceğiz. Bu başarı birçok kişiyi, sicim kuramının bizi, evrenimizin işleyişine dair en derin kavrayışı kazandırma yolunda olduğuna ikna etmiştir.

Sicim kuramının öncülerinden ve önde gelen uzmanlarından biri olan Edward Witten, durumu "sicim kuramı 21. yüzyıl fiziğinin şans eseri 20. yüzyıla düşmüş bir parçasıdır," sözleriyle özetler, ilk kez ünlü İtalyan fizikçi Danielle Amati'nin dile getirdiği bir değerlendirmedir bu. O halde bir anlamda, 19. yüzyıldaki atalarımızın nasıl çalıştıracaklarını bilemedikleri, modern zamanlara özgü süper bir bilgisayarla karşı karşıya kalmış olmasına benzer bir durum söz konusudur. Deneme yanılmalarla süper bilgisayarın gücüne dair ipuçları elde edebilirlerdi, fakat gerçek bir ustalığa erişmeleri sıkı ve uzun süreli bir çaba göstermelerini gerektirirdi. Bilgisayarın potansiyeline dair ipuçları, tıpkı sicim kuramının açıklayıcı gücüne ilişkin kavrayışlarımız gibi, tam bir kullanma yetisi kazanma konusunda son derece güçlü bir saik olurdu. Bugün de benzer bir saik bu kuşaktan fizikçilere, sicim kuramının eksiksiz ve somut bir biçimde anlaşılması çabasına girme enerjisi veriyor.

Witten'ın ve bu alanda çalışan başka uzmanların sözleri, sicim kuramının tam anlamıyla geliştirilip anlaşılmasının yıllar, hatta yüzyıllar alabileceğini gösteriyor. Bu pekâlâ doğru olabilir. Aslına

bakarsanız, sicim kuramının matematiği o kadar karmaşıktır ki, bugüne dek kuramın kesin denklemlerini bilebilen biri çıkmamıştır. Fizikçiler, bu denklemlerin yalnızca yaklaşıklarını bilirler, yaklaşık denklemler bile o kadar karmaşıktır ki, bugüne dek ancak kısmen çözülebilmişlerdir. Yine de 1990'ların son yarısında ilham verici bir dizi atılım -bugüne dek tahayyül edilemez derecede zor görülen kuramsal soruları cevaplayan atılımlar- sicim kuramına ilişkin eksiksiz bir niceliksel anlayışın başta düşünüldüğünden daha yakın olduğunu gösteriyor olabilir pekâlâ. Dünyanın dört bir yanında fizikçiler, bugüne dek kullanılmış olan çok sayıda yaklaşık yöntemi aşmaya yönelik yeni, güçlü teknikler geliştirmekte, hep birlikte canla başla sicim kuramı bulmacasının farklı unsurlarını bir araya getirmekteler.

Şaşırtıcıdır ki, bu gelişmeler kuramın bir süredir kabul görmüş olan bazı temel veçhelerinin yeniden yorumlanması için yeni hareket noktaları sunmaktadır. Örneğin "Neden sicimler? Neden küçük frizbiler değil? Ya da mikroskobik ölçeklerde kabarcıklar değil? Ya da bütün bu olasılıkların bir bileşimi değil?" gibi sorular, Şekil 1.1'e bakarken aklınıza gelebilecek doğal sorulardır. XII. Bölüm'de göreceğimiz üzere, son dönemde ulaştığımız kavrayışlar, bu başka tür bileşenlerin de sicim kuramında önemli bir rolü *olduğunu* göstermekte, sicim kuramının aslında bugün M-kuramı denilen daha büyük bir sentezin bir parçası olduğunu ortaya koymaktadır. Bu son gelişmeler, bu kitabın son bölümlerinde ele alınacaktır.

Bilimdeki ilerlemeler aralıklarla gerçekleşir. Bazı dönemler büyük atılımlarla doludur; başka bazı dönemlerde araştırmacılar kuru sözlerle uğraşır. Bilim insanları hem kuramsal hem deneysel sonuçlar ileri sürer. Sonuçlar bilim çevrelerinde tartışılır; bazen bir kenara bırakılırlar, bazen değiştirilirler, bazen de fiziksel evreni anlamanın yeni ve daha geçerli yolları için ilham verici sıçrama tahtaları olurlar. Başka bir deyişle, bilim nihai gerçek olmasını umduğumuz şeye doğru zikzaklı bir yol izleyerek ilerler; insanlığın, evreni etraflıca anlamaya yönelik ilk girişimleriyle başlamış, sonunu tahmin edemeyeceğimiz bir yoldur bu. Sicim kuramı bu yolda tesadüfi bir dinlenme molası mı, bir dönüm noktası mı, yoksa son

durak mı, bunu henüz bilmiyoruz. Fakat çok sayıda ülkede kendilerini bu işe adamış yüzlerce fizikçi, yüzlerce matematikçi doğru ve muhtemelen de nihai yolda olduğumuza dair bize sağlam bir umut vermişlerdir. Bugünkü anlayış düzeyimizin bile evrenin işleyişine ilişkin yeni, çarpıcı görüşler edinmemizi sağlamış olması, sicim kuramının zengin ve uzun erimli niteliğine ilişkin anlamlı bir işarettir. Bundan sonra gelen sayfaların ana teması, Einstein'ın özel ve genel görelilik kuramlarının uzay ve zaman kavrayışımızda başlattığı devrimi ileriye taşıyan gelişmelerdir.

II. Bölüm

Uzay, Zaman ve Gözlemcinin Gözü

Haziran 1905'te 26 yaşındaki Albert Einstein *Annals of Physics* dergisine teknik bir makale gönderdi; on yıl kadar önce bir delikanlıyken aklına takılan, ışıkla ilgili bir paradoks hakkındaydı makalesi. Derginin editörü Max Planck Einstein'ın makalesinin son sayfasını da çevirdikten sonra anladı ki, kabul gören bilimsel düzen yerle bir olmuştu, İsviçre'de Bern'de yaşayan bir patent ofisi kâtibi, geleneksel uzay ve zaman kavrayışlarını gürültüsüz patırtısız tamamen alt üst etmiş, bu kavrayışların yerine, ortak deneyimlerimizden aşina olduğumuz her şeye karşı olan yeni bir kavrayış geçirmişti.

Einstein'ı on yıldır uğraştıran paradoks şuydu: 1800'lerin ortalarında iskoç fizikçi James Clerk Maxwell, ingiliz fizikçi Michael Faraday'ın deneysel çalışmalarını yakından inceledikten sonra elektrik ile manyetizmayı *elektromanyetik alan* çerçevesinde birleştirmeyi başarmıştı. Gökgürültülü ve şimşekli bir fırtına öncesinde bir dağın tepesinde bulunduysanız ya da bir Van de Graafjeneratörünün yakınlarında durduysanız elektromanyetik alanın ne olduğunu iç organlarınızla anlamışsınızdır, çünkü hissetmişsinizdir. Bunu yaşamamışsanız eğer, şöyle anlatabiliriz: Elektromanyetik alan, uzayda içinden geçtikleri bölgeye nüfuz eden elektrik ve manyetik kuvvet çizgilerinden oluşan bir dalga gibidir. Örneğin bir mıknatısın yakınına demir tozu serpiştirdiğinizde, tozların oluşturduğu düzenli örüntü, manyetik kuvvetin gözle görünmeyen çizgilerini ortaya çıkarır. Kuru bir günde üzerinizdeki yün kazağı çıkarırken bir çıtırtı duyup belki bir iki kere elektrik çarpmış gibi olursunuz; kazağınızın liflerinin topladığı elektrik yükünün yarattığı elektrik kuvvet çizgilerinin varlığına tanık olmaktasınızdır. Maxwell'in kuramı, bu ve diğer bütün elektrik ve manyetik olguları tek bir matematiksel çerçevede birleştirmenin ötesinde, pek de beklenmedik bir biçimde elektromanyetik dalgaların sabit, hiç değişmeyen bir hızda, sonradan ışık hızına yakın olduğu anlaşılan bir hızda yol

aldığını göstermişti. Maxwell buradan, görülebilir ışığın bir tür elektromanyetik dalgadan başka bir şey olmadığını anladı; bugün bu dalganın retinadaki kimyasallarla etkileşime girerek görme duyumuna yol açtığı anlaşılmıştır. Ayrıca (burası önemlidir) Maxwell'in kuramı bütün elektromanyetik dalgaların -görünebilir ışık da dahil- durmadan bir yerden bir yere giden bir seyyaha benzediğini göstermiştir. Elektromanyetik dalgalar hiç durmaz, hiç yavaşlamaz. Işık *hep* ışık hızında yol alır.

Tıpkı 16 yaşındaki Einstein'ın yaptığı gibi "Peki ışık hızında hareket ederek bir ışık demetinin peşine düşersek ne olur?" diye soruncaya kadar her şey iyi hoş. Kökleri Newton'un hareket yasalarına uzanan sezgisel akıl yürütme, ışık dalgalarına yetişeceğimizi, böylece dalgaların sabit görüneceğini, ışığın duracağını söyler. Fakat Maxwell'in kuramına ve bütün güvenilir gözlemlere göre durağan ışık diye bir şey yoktur: Bugüne dek hiç kimse avcunda durağan bir ışık topağı tutmamıştır. Sorun da buradan çıkar. Talihe bakın ki, Einstein dünyanın önde gelen birçok fizikçisinin bu soruyla uğraştığından (ve yanlış yollara saptığından) habersizdi ve Maxwell ile Newton'un paradoksu üzerine büyük ölçüde düşüncelerinin bozulmamış mahremiyeti içerisinde kafa yormuştu.

Bu bölümde Einstein'ın bu çatışmayı özel görelilik kuramıyla nasıl çözdüğünü, bunu yaparken uzay ve zaman kavrayışlarımızı nasıl tamamen değiştirdiğini tartışacağız. Özel göreliliğin temel kaygısının, dünyanın genelde "gözlemciler" denilen ve hareketleri birbirleriyle görelilik oluşturan bireylere tam olarak nasıl göründüğünü anlamak olması şaşırtıcı olabilir, ilk başta, son derece önemsiz zihinsel bir egzersiz gibi görünebilir. Tam tersine: Işık demetlerini takip eden gözlemcileri hayal eden Einstein'ın elinde, en sıradan durumların bile göreli hareket durumundaki bireylere nasıl göründüğünü tam olarak anlamamızı sağlayacak sağlam bazı sonuçlar vardı.

İçgüdü ve Kusurları

Ortak deneyim, bireylerin gözlemlerinin hangi biçimlerde farklılaşabileceğini gösterir. Örneğin bir yol kenarındaki ağaçlar, şoförün bakış açısından hareket ediyormuş gibi görünür, oysayol kenarındaki korkuluklara oturmuş otostopçunun bakış açısına göre durağandırlar. Aynı şekilde, şoförün bakış açısından otomobilin gösterge paneli hareket ediyor gibi görünmez (yani öyle umalım), otostopçunun bakış açısına göre ise otomobilin geri kalan kısımları gibi kontrol paneli de hareket ediyor görünür. Bunlar dünyanın işleyişine dair öyle temel, öyle sezgisel özelliklerdir ki, pek dikkate almayız.

Fakat özel görelilik, böyle iki bireyin gözlemleri arasındaki farklılıkların o kadar kolay görülemeyen, daha köklü farklılıklar olduğunu gösterir. Göreli hareket durumundaki gözlemcilerin mesafeyi ve zamanı farklı algılayacakları gibi tuhafbir iddiada bulunur. Bu da birazdan göreceğimiz gibi, göreli hareket durumundaki iki bireyin taktığı kol saatlerinin *farklı hızlarda* çalışacağı, dolayısıyla seçilmiş olaylar arasında ne kadar zaman geçtiği konusunda aynı sonucu vermeyecekleri anlamına gelir. Özel görelilik, bu ifadenin söz konusu kol saatlerinin doğru olmadığını söylemediğini, aksine zamanın kendisi hakkında doğru bir ifade olduğunu gösterir.

Aynı şekilde, ellerinde birbirinin tamamen aynı birer metre olan göreli hareket durumundaki bireyler, ölçülen mesafe konusunda da aynı sonuca varamayacaktır. Bu durum da ölçüm aygıtlarındaki ya da bunların kullanımındaki hatalardan kaynaklanmaz. Dünyanın en hatasız ölçüm aygıtları, uzay ile zamanın -mesafe ve süre olarak ölçüldüklerinde- herkes tarafından aynı şekilde algılanmadığını doğrulamıştır. Özel görelilik, tam da Einstein'ın tasvir ettiği şekilde, harekete dair sezgilerimizle ışığın özellikleri arasındaki çatışmayı çözer, ama bunun bir bedeli vardır: Birbirlerine göre hareket halinde olan bireylerin uzaya ve zamana ilişkin gözlemleri aynı olmayacaktır.

Einstein'ın bu büyük keşfini dünyaya duyurmasının üstünden neredeyse bir yüzyıl geçti, fakat çoğumuz hâlâ uzayı ve zamanı mutlak terimlerle düşünüyoruz. Özel göreliliği iliklerimizde

hissetmiyoruz. Etkileri sezgilerimizin temel bir parçası değil. Bunun sebebi gayet basit: Özel göreliliğin etkileri, insanın ne kadar hızlı hareket ettiğine bağlıdır; otomobillerin, uçakların, hatta uzay mekiklerinin hızı söz konusu olduğunda bile bu etkiler çok küçüktür. Yerde duran ve otomobilde ya da uçakta seyahat eden bireyler arasında uzay ve zaman algısı açısından farklılıklar *meydana gelir,* fakat bunlar o kadar küçüktür ki fark edilmezler. Ama ışık hızına yakın bir hızda seyahat eden bir uzay aracıyla bir seyahate çıkabilecek olsanız, göreliliğin etkileri gayet belirgin olacaktır. Tabi bu hâlâ bilimkurgunun konusu. Yine de, daha sonraki bölümlerde de tartışacağımız üzere, akıllıca düzenlenmiş deneyler, uzayın ve zamanın Einstein'ın kuramının öngördüğü göreli özelliklerinin net bir biçimde gözlemlenmesini mümkün kılar.

Bahsettiğimiz ölçekleri biraz kavrayabilmek için 1970 yılında olduğumuzu, büyük, hızlı otomobillerin moda olduğunu düşünün. Bütün birikimini yeni bir Trans Amayatıran Slim, satıcının izin vermediği türden bir deneme sürüşü yapabilmek için kardeşi Jim'le birlikte o civardaki otomobil yarışına elverişli bölgeye gider. Slim otomobilin motorunu hızlandırdıktan sonra, 1 mil (1,6 kilometre) uzunluğundaki yolu saatte 120 mil (yaklaşık 195 kilometre) hızla şimşek gibi kat eder, bu arada Jim de kenarda durup zaman tutar. Bağımsız bir doğrulama isteyen Slim de yeni otomobilinin yolu ne kadar zamanda kat edeceğini görmek için koluna kronometreli bir saat takmıştır. Einstein'ın çalışması öncesinde hiç kimse her iki kronometrenin de, tabi eğer düzgün çalışıyorlarsa, geçen zamanın aynı olduğunu göstereceğinden şüphe etmezdi. Fakat özel göreliliğe göre Jim geçen zamanı 30 saniye olarak ölçerken, Slim'in kronometresi 29,99999999999952 saniye geçtiğini gösterecektir - yani *birazcık daha az.* Tabi bu farklılık o kadar küçük ki, parmakla basılarak çalıştırılan kronometrelerin, Olimpiyatlar'da kullanılan zaman ölçüm sistemlerinin, hatta en hassas atom saatlerinin çok ötesinde bir hassaslıktaki zaman ölçerlerle ölçülebilir ancak. Gündelik deneyimlerimizin, zamanın akışının hareket durumumuza bağlı olduğu gerçeğini ortaya koymaması hiç şaşırtıcı değil.

Uzunlukların ölçümü konusunda da benzer bir uyuşmazlık vardır. Örneğin başka bir deneme sürüşünde Jim, Slim'in yeni otomobilinin uzunluğunu ölçmek için akıllıca bir numaraya başvurur: Kronometresini tam otomobilin önü ona ulaştığında çalıştırır ve otomobilin arkası önünden geçtiğinde durdurur. Jim, Slim'in saatte 120 mil (yaklaşık 195 kilometre) hızla gittiğini bildiğinden bu hızı kronometrenin gösterdiği süreyle çarparak otomobilin uzunluğunu hesaplayabilir. Yine Einstein öncesinde hiç kimse, Jim'in böyle dolaylı bir biçimde ölçtüğü uzunluğun, Slim'in otomobil galeride hareketsiz dururken ölçtüğü uzunlukla *tamı tamına* aynı olup olmayacağını sorgulamazdı bile. Tersine özel görelilik, Slim ile Jim bu şekilde kesin ölçümler gerçekleştirirlerse ve Slim otomobilin farz edelim tam olarak 16 feet (yaklaşık 5 metre) uzunluğunda olduğunu bulursa, Jim'in ölçümünün de otomobilin 15,99999999999974 feet (yaklaşık 4,6 metre) uzunluğunda -yani *birazcık daha az-* olduğunu göstereceğini söyler. Tıpkı zaman ölçümlerinde olduğu gibi bu da o kadar küçük bir farklılıktır ki, sıradan aygıtlar bunu belirleyecek doğrulukta değildir.

Bu farklılıklar son derece küçük olsalar da, uzay ve zamanın evrensel ve değişmez olduğu yönündeki yaygın kavrayışta temel bir kusur olduğunu gösterirler. Bireylerin, örneğin Slim'in ve Jim'in göreli hızları arttıkça bu kusur giderek belirginleşir. Farklılıkların ayırt edilebilir olması için, söz konusu hızların mümkün olan en yüksek hıza -yani ışık hızına- yakın olması gerekir; Maxwell'in kuramı ve deneysel ölçümler ışık hızının saniyede 186.000 mil (yaklaşık 300.000 kilometre) olduğunu, yani saatte 670 milyon mil (yaklaşık 1 milyar kilometre) olduğunu göstermiştir. Bu hızla Dünya'nın çevresinde saniyede yedi kere dolaşılabilir. Örneğin Slim, saatte 120 mil (yaklaşık 195 kilometre) değil de 580 milyon mil (870 milyon kilometre) hızla (ışık hızının yüzde 87'si) gidiyor olsaydı, özel görelilik matematiğine göre Jim otomobilin uzunluğunu 8 feet (yaklaşık 2,5 metre) olarak ölçecekti; bu da Slim'in yaptığı ölçümden (otomobilin kullanıcı kılavuzunda belirtilen özelliklerden de) ciddi oranda farklı olacaktı. Aynı şekilde, Jim'e göre yarış yolunu kat etme süresi de Slim'in ölçtüğü sürenin *iki* katı olacaktı.

Bu tür muazzam hızlara günümüzde erişilemediğinden, teknik olarak "zaman genleşmesi" ve "Lorentz büzülmesi" diye isimlendirilen bu olguların etkileri gündelik hayatta son derece küçüktür. Işık hızınayakın hızlardayol almanın normal olduğu bir dünyada yaşıyor olsaydık, uzay ve zamanın bu özellikleri -onları sürekli gözlemleyebileceğimiz için- o kadar sezgisel olurdu ki, üzerlerinde bu bölümün başında bahsettiğimiz, yolun kenarındaki ağaçların görünür hareketinden daha fazla durmazdık. Fakat öyle bir dünyada yaşamadığımızdan, bu özelliklere aşina değiliz. İleride göreceğimiz gibi, bunları anlamak ve kabul etmek, dünyayı algılayışımızı her bakımdan gözden geçirmemizi gerektiriyor.

Görelilik İlkesi

Özel göreliliğin temelinde, basit fakat kökleşmiş iki yapı vardır. Daha önce de belirttiğimiz gibi biri ışığın özellikleriyle ilgilidir; bunu gelecek bölümde daha kapsamlı tartışacağız. Diğeriyse daha soyuttur. Belli bir fizik yasasıyla değil, *bütün* fizik yasalarıyla ilgilidir ve *görelilik ilkesi* olarak bilinir. Görelilik ilkesi basit bir gerçeğe dayanır: Hızdan ya da yönlü hızdan (bir nesnenin hızı ve hareket doğrultusu) bahsettiğimizde, ölçümü kimin ya da neyin yaptığını özel olarak belirtmemiz gerekir. Şimdi anlatacağım durum üzerine düşünerek, bu ifadenin anlamını ve önemini kolayca anlayabiliriz.

Üzerinde yanıp sönen küçük bir kırmızı ışık bulunan bir uzay elbisesi giymiş olan George'un bütün gezegenlerden, yıldızlardan, galaksilerden uzakta, tamamen boş evrenin mutlak karanlığında yüzdüğünü düşünün. Kendi bakış açısına göre George tümüyle durağandır, kozmosun durgun karanlığına gömülmüştür. George uzakta yanıp sönen küçük bir yeşil ışık görür, ışık giderek yaklaşıyor gibi görünmektedir. Sonunda ışık iyice yaklaşır ve George bu ışığın, başka bir uzay gezgininin, boşlukta ağır ağır yüzen Gracie'nin uzay elbisesinin üzerinde olduğunu anlar. Gracie geçerken ona el sallar, George da karşılık verir ve sonra Gracie uzaklaşıp gider. Bu hikâye Gracie'nin bakış açısından da aynen geçerlidir. Hikâyenin başında Gracie dış uzayın muazzam karanlığında yapayalnızdır. Uzakta yanıp sönen kırmızı bir ışık görür, ışık giderek yaklaşıyormuş gibi

görünmektedir. Sonunda iyice yaklaşır ve Gracie bu ışığın, başka bir varlığın, boşlukta ağır ağır yüzen George'un uzay elbisesinin üzerinde olduğunu anlar. George geçerken ona el sallar, Gracie de karşılık verir ve sonra George uzaklaşıp gider.

Bu iki hikâye, aynı durumu birbirinden farklı fakat aynı ölçüde geçerli iki bakış açısından betimlemektedir. Gözlemcilerin ikisi de durağan olduklarını hissetmekte, diğerini hareket halinde algılamaktadır. Her iki bakış açısı da anlaşılabilir ve haklı çıkarılabilir niteliktedir. İki uzay gezgini arasında bir simetri bulunduğundan birinin bakış açısının "doğru", diğerininkinin "yanlış" olduğunu söylemenin hiçbir temeli yoktur. Her iki bakış açısı da aynı ölçüde doğruluk iddiası taşır.

Bu örnek görelilik ilkesinin anlamını gayet iyi açıklıyor: Hareket kavramı görelidir. Bir nesnenin hareketinden ancak bir başka nesneye göre ya da bir başka nesneyle kıyaslayarak bahsedebil iriz. Dolayısıyla, kıyaslama yapmamızı sağlayacak başka bir nesne belirlemediğimiz için "George saatte 10 kilometre hızla yol alıyor" ifadesinin bir anlamı yoktur. Ama "George, Gracie'nin yanından saatte 10 kilometre hızla geçiyor" ifadesinin bir anlamı vardır, çünkü Gracieyi karşılaştırma noktası olarak belirlemişizdir. Örneğimizin de gösterdiği gibi, bu son ifade "Gracie, George'un yanından (ters yönde) saatte 10 kilometre hızla geçiyor" ifadesiyle tamamen aynıdır. Başka bir deyişle "mutlak" bir hareket kavramı yoktur. Hareket görelidir.

Bu hikâyenin kilit unsuru George'un ve Gracie'nin kuvvetten bağımsız, sabit hız ve doğrultudaki hareketlerinin seyrini bozabilecek bir kuvvet, yani etki tarafından ne itiliyor ne de çekiliyor olması, başka bir etkiye maruz kalmamasıdır. Dolayısıyla, *kuvvetten bağımsız* hareketin sadece başka nesnelere kıyasla anlamlı olduğu ifadesi daha kesin bir ifadedir. Bu önemli bir açıklamadır, çünkü işin içine kuvvetler dahil olursa, gözlemcilerin hızlarında -hızlarında ve/veya hareket doğrultularında- değişiklikler olur ve bu değişiklikler hissedilebilir. Örneğin George'un giysisinin sırtında ateşleyebileceği bir tepkili motor olsaydı, hareket ettiğini kesinlikle hissederdi. Bu içkin

bir histir. George motoru ateşleseydi, gözleri kapalı da olsa, dolayısıyla başka nesnelerle kıyaslama yapamayacak durumda olsa bile hareket ettiğini *bilirdi.* Kıyaslama yapamaz durumdayken dahi, "dünyanın geri kalanı yanından geçip giderken" kendisinin durduğunu iddia edemezdi. Sabit hızdaki ve sabit doğrultudaki hareket görelidir; hızı ve doğrultusu sabit olmayan hareket, yani başka bir deyişle *ivmeli hareket* için ise aynı şey geçerli değildir. (Gelecek bölümde ivmeli hareketi ele alıp Einstein'ın genel görelilik kuramını tartıştığımızda bu ifadeyi yeniden ele alacağız.)

Bu hikâyelerin boş uzayın karanlığında geçmesi aşina olduğumuz, haklı olarak olmasa da genellikle "durağanlık" gibi özel bir statü atfettiğimiz sokakları ve binaları ortadan kaldırarak konuyu anlamamıza katkıda bulunuyor. Bununla beraber aynı ilke Dünya üzerindeki ortamlar için de geçerlidir ve aslında herkes tarafından yaşanır. Diyelim ki trende uyuyakaldınız ve treniniz tam başka bir trenin yanından geçerken uyandınız. Yanından geçmekte olduğunuz tren başka nesneleri görmenizi engellediği, pencereden baktığınızda sadece diğer treni gördüğünüz için geçici olarak sizin treninizin mi, diğer trenin mi, yoksa ikisinin birden mi hareket ettiğini anlayamayabilirsiniz. Elbette ki treniniz sarsılırsa ya da bir virajı alırken doğrultu değiştirirse hareket ettiğinizi anlarsınız. Fakat tren sarsılmadan dümdüz gidiyorsa -trenin hızı ve doğrultusu sabitse- trenlerin birbirine göre hareket ettiğini görür, ancak hangisinin hareket ettiğini kesin olarak söyleyemezsiniz.

Eladi bir adım daha ileri gidelim. Böyle bir trende olduğunuzu, perdeleri iyice çektiğinizi, pencerelerin tümüyle kapandığını düşünün. Kendi kompartımanınız dışında bir şey göremeyeceğiniz için (trenin sabit bir hızla, hep aynı doğrultuda ilerlediğini varsayarak) hareket edip etmediğinizi hiçbir biçimde belirleyemezsiniz. İçinde bulunduğunuz kompartıman, tren ister raylar üzerinde duruyor olsun, ister yüksek hızda hareket ediyor olsun, size *kesinlikle* aynı görünecektir. Einstein aslında Galileo'ya dek uzanan bu fikri, ne sizin ne trendeki başka bir yolcunun kapalı kompartıman içindeyken trenin hareket edip etmediğini belirleyebilecek bir deney yapabileceğini söyleyerek göstermişti. Bu da yine görelilik ilkesine çıkar: Kuvvetten

bağımsız tüm hareketler tümüyle göreli olduğundan, ancak yine kuvvetten bağımsız olarak hareket eden başka nesnelere ya da bireylere kıyasla anlamlıdır. "Dış" nesnelerle doğrudan ya da dolaylı bazı kıyaslamalar yapmaksızın hareket edip etmediğinizi anlamanızın bir yolu yoktur. "Mutlak" sabit hız ve doğrultuda hareket diye bir kavram yoktur; fizik açısından yalnızca kıyaslama yapmanın anlamı vardır.

Aslına bakarsanız Einstein görelilik ilkesinin daha da büyük bir iddiada bulunduğunu fark etmişti: Fizik yasaları -hangi yasa olursa olsun- sabit bir hız ve doğrultuda hareket eden bütün gözlemciler için tamamen aynı olmalıdır. George ile Gracie uzayda tek başlarına yüzmüyor da uzayda yüzmekte olan uzay istasyonlarında birbirinin aynı bir dizi deney gerçekleştiriyor olsalardı buldukları sonuçlar aynı olacaktı. Eler iki istasyon da göreli hareket halinde olsa da hem George hem de Gracie yine kendi istasyonlarının duruyor olduğuna inanmakta haklıdır. Kullandıkları donanım tamamen aynıysa, iki deney düzeneğini birbirinden ayıran bir şey olmayacaktır; düzenekler tümüyle simetriktir. Eler ikisinin deneylerden çıkardığı fizik yasaları dayi-ne aynı olacaktır. Ne onlar ne de deneyleri sabit hız ve doğrultuda yol aldıklarını algılayabilir, yani hiçbir biçimde hareket halinde oldukları bilgisini kullanamaz. Bu tür gözlemciler arasında tam bir simetri oluşturan şey işte bu basit kavramdır; görelilik ilkesinin özündeki kavram da budur. Bu ilkeyi birazdan iyice incelenmesi gereken bir biçimde kullanacağız.

Işık Hızı

Özel göreliliğin ikinci kilit bileşeni ışık ve ışığın hareketinin özellikleriyle ilgilidir. "George saatte 10 kilometre hızla yol alıyor" ifadesinin kıyaslama yapmamızı sağlayacak bir karşılaştırma noktası olmaksızın hiçbir anlamı olmadığını iddia etmiştik. Ama bu iddianın tersine, kendilerini işlerine adamış bir dizi deneysel fizikçi neredeyse yüzyıllık bir çabayla, *kıyaslama için bir karşılaştırma noktası olmaksızın da* bütün gözlemcilerin ışığın saatte yaklaşık 1 milyar kilometre hızla yol aldığını kabul edeceğini göstermiştir.

Bu gerçek, evrene bakışımızda bir devrim yapmamızı gerekli kılmıştır. Önce daha sıradan nesneleri konu alan benzer ifadelerle kıyaslayarak, bu ifadenin ne anlama geldiğini anlayalım. Diyelim ki güzel, güneşli bir gün, siz de bir arkadaşınızla top oynamak için dışarı çıkıyorsunuz. Bir süre ikiniz de tembel tembel topu birbirinize saniyede diyelim ki 6 metre hızla atıp tutuyorsunuz. Gelgelelim birden bire şimşek çakmaya, gök gürlemeye başlıyor, ikiniz de kaçıp saklanıyorsunuz. Fırtına dindikten sonra oyuna devam etmek için yine bir araya geliyorsunuz, fakat bir şeyin değiştiğini fark ediyorsunuz. Arkadaşınızın saçları darmadağın, diken diken olmuş ve size sert sert, deli deli bakıyor. Eline baktığınızda hayretle görüyorsunuz ki artık sizinle top oynamak istemiyor, onun yerine size bir el bombası fırlatmaya hazırlanıyor. Tabi sizin de top oynama hevesiniz kalmıyor, dönüp kaçmaya başlıyorsunuz. Arkadaşınız el bombasını fırlattığında bombayine size doğru uçacak, ama siz koştuğunuz için bombanın size yaklaşma hızı saniyede 6 metreden az olacak. Aslında sağduyu bize, saniyede diyelim ki 4 metre hızla koşuyorsanız, el bombasının size (6-4)=2 metre hızlayaklaşacağını söyler. Başka bir örnek verelim: Diyelim ki dağdasınız ve üstünüze çığ geliyor, dönüp kaçma eğiliminde olursunuz, çünkü o zaman çığın size yaklaşma hızı azalacaktır ve bu da genel olarak iyi bir şeydir. Hareketsiz haldeki bir bireye göre yaklaşmakta olan çığın hızı, kaçmakta olan bir bireyin algıladığından daha fazladır.

Şimdi top, el bombası ve çığ ile ilgili bu genel gözlemleri ışıkla ilgili gözlemlerle kıyaslayalım. Kıyaslarımız daha doğru olsun diye, bir ışık demetinin foton olarak bilinen küçük "paketlerden" (ışığın, IV. Bölüm'de daha etraflıca tartışacağımız bir özelliği) oluştuğunu düşünün. Bir feneri yaktığımızda ya da bir lazer ışını demeti gönderdiğimizde, aslında aygıtı yönelttiğimiz doğrultuda bir foton demeti gönderiyoruz demektir. El bombası ve çığ örneklerinde olduğu gibi, bir fotonun hareketinin, hareket halindeki birine nasıl göründüğünü düşünelim. Diyelim ki çdgın arkadaşınız el bombası yerine güçlü bir lazer taşıyor. Lazeri size doğru ateşlerse -sizde de uygun ölçüm cihazı varsa- demetteki fotonların yaklaşma hızının saatte yaklaşık 1 milyar kilometre olduğunu bulursunuz. Peki ya el bombasıyla top oynama ihtimali karşısında yaptığınız gibi kaçarsanız

ne olur? Yaklaşmakta olan fotonların hızı o zaman ne olacaktır? İşleri biraz daha karıştıralım, diyelim ki uzay gemisi *Atılgana,* bindiniz ve arkadaşınızdan saatte 160 milyon kilometre hızla uzaklaşmaya başladınız. Geleneksel Newtoncu dünya görüşüne dayanan akıl yürütmeyi izleyecek olursak, artık arkadaşınızdan hızla uzaklaşmakta olduğunuzdan yaklaşan fotonların hızının *azaldığını* görmeyi beklersiniz. Size (saatte 1 milyar kilometre-saatte 160 milyon kilometre=) saatte 840 milyon kilometre hızla yaklaştıklarını bulmayı umarsınız.

Geçmişleri 1880'lere kadar uzanan çeşitli deneylerden elde edilen yığınla kanıt, ayrıca Maxwell'in ışığın elektromanyetik kuramının titizlikle incelenmesi ve yorumlanması bilim camiasını yavaş yavaş aslında göreceğiniz şeyin bu *olmayacağına* ikna etmiştir. *Kaçıyor olsanız da, yaklaşmakta olan fotonların hızını saatte 1 milyar kilometre olarak ölçersiniz, bundan birazcık bile az değil.* Başta kulağa tümüyle saçma gelse de, yaklaşmakta olan bir toptan, el bombasından ya da çığdan kaçarken olanın tersine, yaklaşmakta olan fotonların hızı hep saatte 1 milyar kilometredir. Aynı şey size yaklaşmakta olan fotonların üstüne doğru gittiğinizde ya da peşlerinden koştuğunuzda da geçerlidir. Yaklaşmaya da uzaklaşma hızları hiç değişmez, fotonlar yine saatte 1 milyar kilometre hızla yol alıyor görünecektir. Foton kaynağı ile gözlemci arasındaki göreli hareketten bağımsız olarak, ışığın hızı her zaman aynıdır.

Yukarıda betimlenen türden ışık "deneyleri" teknolojik sınırlamalar yüzünden aslında yapılamaz. Fakat kıyaslanabilecek deneyler yapılabilir. Örneğin 1913'te Hollandalı fizikçi Willem de Sitter, hızla hareket eden çift yıldız sistemlerinin (birbirinin çevresinde dönen iki yıldız) hareket eden bir kaynağın ışık hızının üzerindeki etkisini ölçmekte kullanılabileceğini ileri sürdü. Geçtiğimiz 80 yıl içinde yapılan bu tür deneyler, hareketli biryıldızdan gelen ışığın hızının, sabit biryıldızdan gelen ışığın hızıyla *aynı* olduğunu -saatte 1 milyar kilometre- giderek gelişen ölçüm aygıtlarıyla elde edilen kesin sonuçlarla gösterdi. Ayrıca geçen yüzyıl boyunca başka birçok detaylı deney daha -ışık hızını çeşitli koşullarda doğrudan ölçmenin yanı sıra, ışığın kısaca ele aldığımız bu özelliğinden kaynaklanan

sonuçlan sınayan deneyler- gerçekleştirildi ve hepsi de ışık hızının sabit olduğunu doğruladı.

Işığın bu özelliğini kabullenmekte zorlandıysanız, yalnız değilsiniz. Yüzyıl başında fizikçiler bunu çürütmek için çok uğraşmışlardı. Yapamadılar. Einstein ise tersine, ışık hızının sabit olduğunu kabul etti, çünkü gençliğinden beri onu uğraştıran paradoksun cevabı orada yatıyordu: Bir ışık demetini ne kadar kovalarsanız kovalayın, yine de sizden ışık hızında uzaklaşır. Işığı durgun görüneceği kadar yavaşlatmak şöyle dursun, ışığın görünür hızını saatte 1 milyar kilometreden zerre kadar daha az yapamazsınız. Konu kapanmıştır. Fakat paradoksa karşı kazanılmış bu zafer, hiç de küçük bir zafer değildi. Einstein, ı şık hızının sabit oluşunun Newton fiziğinin sonunu getirdiğini anlamıştı.

Gerçek ve Sonuçlan

Hız, bir nesnenin belli bir süre içinde ne kadar yol alabileceğinin ölçüsüdür. Saatte 100 kilometreyle yol alan bir otomobilin içindeysek, tabi ki bir saat boyunca bu hareket halini korursak 100 kilometre yol alacağız demektir. Bu biçimde dile getirildiğinde hız hayli sıradan bir kavramdır. Topların, kartoplarının ve fotonların hızı hakkında neden o kadar gürültü kopardığımızı merak ediyor olabilirsiniz. Fakat unutmayalım ki *mesafe* uzaya ilişkin bir kavramdır; iki nokta arasında ne kadar uzay olduğunun ölçüsüdür. Şunu da unutmayalım ki *süre* de zamanla ilgili bir kavramdır; iki olay arasında geçen zamandır. Dolayısıyla hız, uzay ve zaman kavramlarıyla yakından bağlantılıdır. Bu biçimde dile getirdiğimizde, hızla ilgili ortak kavrayışımıza ters düşen herhangi bir deneysel olgunun, örneğin ışığın hızının sabit olmasının, uzayla ve zamanla ilgili ortak kavrayışlarımıza ters düşme potansiyeli taşıdığını görürüz. Işık hızıyla ilgili tuhaf gerçek, işte bu yüzden ayrıntılı olarak incelenmeyi hak ediyor; Einstein bu incelemeyi yapmış, olağanüstü sonuçlara ulaşmıştır.

Zaman Üzerindeki Etki: I. Kısım

Pek az çabayla, ışık hızının sabit olmasından yararlanarak bildik gündelik zaman kavrayışımızın açıkça hatalı olduğunu gösterebiliriz. Diyelim ki savaş halindeki iki ülkenin liderleri uzun bir müzakere masasının iki ucuna oturmuş ve ateşkes kararı almışlar, ama ikisi de anlaşmayı ilk imzalayan olmak istemiyor. Birleşmiş Milletler Genel Sekreteri parlak bir öneri getiriyor: İki başkanın tam ortasına bir ampul yerleştirilecek, ampul başta kapalı olacak. Ampul açıldığında yaydığı ışık, iki başkan da ampule eşit uzaklıkta olduğu için, ikisine de aynı anda ulaşacak. İki başkan da ışığı gördüklerinde anlaşmayı imzalamayı kabul ediyor, plan uygulanıyor ve anlaşma her iki taralı da tatmin edecek şekilde imzalanıyor.

Bu başarıyla koltuklan kabaran Genel Sekreter, barış anlaşmasına varmış savaş halindeki başka iki ülke için de aynı yaklaşımı kullanmaya karar veriyor. Bu sefer tek fark, bu müzakeredeki devlet başkanlarının sabit bir hız ve doğrultuda ilerleyen bir trenin içindeki bir masanın iki ucunda oturuyor olmaları. Adlarına uygun düşecek şekilde, İleriülke'nin liderinin yüzü trenin hareket doğrultusuna dönük, Geriülke'nin liderinin yüzü ise hareket doğrultusunun tersine. Fizik yasalarının bireyin hareketinden -bu hareket değişmediği sürece- bağımsız olarak kesinlikle aynı kalacağını bilen Genel Sekreter, farkı dikkate almıyor ve ampulün yanmasıyla başlayan imza törenini daha önce yapıldığı gibi gerçekleştiriyor. İki başkan da anlaşmayı imzalıyor ve danışman heyetleriyle birlikte düşmanlıkların son bulmasını kutluyor.

Gelgelelim tam o sırada, imza törenini hareket halindeki trenin dışındaki platformdan izlemiş olan iki ülke halkı arasında çatışmaların başladığı haberi geliyor. İleriülke halkının kandırıldıklarını ve başkanlarının anlaşmayı Geriülke'nin liderinden daha *önce* imzaladığını iddia ettiğini, çatışmaların bu yüzden yeniden patlak verdiğini öğrenmek müzakere trenindeki herkesi dehşete düşürüyor. Trendeki herkes -iki taraf da- anlaşmanın aynı anda imzalandığında hemfikir olduğuna göre, töreni izleyen dışarıdaki gözlemciler nasıl bunun aksini düşünebilir?

Platformdaki gözlemcinin bakış açısını daha detaylı inceleyelim. Başlangıçta trendeki ampul kapalıdır, sonra belli bir anda yanar ve her iki başkana doğru ışık demetleri gönderir. Platformdaki bir kişinin bakış açısına göre, İleriülke'nin başkanı yayılan ışığa doğru gitmektedir, Geriülke'nin başkanı ise ışıktan uzaklaşmaktadır. Yani platformdaki gözlemcilere göre ışık demetinin, yaklaşmakta olan ışığa doğru giden İleriülke devlet başkanına ulaşmak için, ışıktan uzaklaşan Geriülke başkanına ulaşmak için kat ettiği yol kadar yol kat etmesi gerekmez. Bu, ışığın her iki başkana doğru yol alırkenki *hızıyla* ilgili bir ifade değildir; ışık kaynağının ya da gözlemcinin hareket halinden bağımsız olarak, ışığın hızının hep aynı olacağını zaten belirtmiştik. Şimdi sadece ilk ışık çakımının, platformdaki gözlemcilerin bakış açısına göre, her iki başkana da ulaşmak için *ne kadar* yol kat etmesi gerektiğini betimlemeye çalışıyoruz. Bu mesafe İleriülke'nin başkanı için, Geriülke'nin başkanı için olduğundan daha kısa olduğundan ve ışık her iki başkana doğru aynı hızla yol aldığından, ışık önce İleriülke'nin başkanına ulaşacaktır. İleriülke yurttaşlarının kandırıldıklarını iddia etmesinin sebebi budur.

CNN görgü tanıklarının ifadelerini aktardığında Genel Sekreter, başkanlar ve danışmanlar kulaklarına inanamaz. Hepsi de, ampulün tam iki başkanın arasına gayet sağlam olarak yerleştirildiğinde, dolayısıyla başka söze gerek bırakmayacak şekilde ampulün yaydığı ışığın başkanlara ulaşmak için aynı *mesafeyi* kat ettiğinde hemfikirdir. Hem sağa hem de sola doğru yayılan ışığın hızı aynı olduğundan, ışığın her iki başkana da aynı anda ulaştığını düşünmektedirler, hatta öyle olduğunu gözlemlemişlerdir.

Peki kim haklı, trendekiler mi trenin dışındakiler mi? İki grubun gözlemlerinde de, gözlemlerini destekleyen açıklamalarında da hata yok. Cevap her *iki* tarafın da *haklı* olduğudur. Uzay gezginlerimiz George ile Gracie için olduğu gibi, iki bakış açısı da aynı ölçüde doğruluk iddiası taşımaktadır. Buradaki ayrıntı, iki doğrunun çelişiyor gibi görünmesidir. Önemli bir siyasi mesele söz konusu: Başkanlar anlaşmayı aynı anda imzaladı mı? Yukarıdaki gözlemler ve akıl yürütme bizi kaçınılmaz olarak anlaşmanın *trendekilere göre aynı anda imzalandığı,* ama *platformdakilere göre aynı anda*

imzalanmadığı sonucuna götürür. Başka bir deyişle, iki gözlemci grubu göreli hareket halindeyse, bazı gözlemcilerin bakış açısına göre eşzamanlı olan şeyler, diğer gözlemcilerin bakış açısına göre eşzamanlı olmayacaktır.

Bu şaşırtıcı bir sonuçtur. Gerçekliğin doğasına dair bugüne kadar keşfedilmiş en derin kavrayışlardan biridir. Yine de bu kitabı okuyup bir kenara bıraktıktan uzun süre sonra, bu bölümden şu talihsiz barış girişimi dışında bir şey hatırlamayacak olsanız bile, Einstein'ın keşfinin özünü kapmış olurdunuz. Hiç yüksek matematiğe ya da karışık bir mantık zincirine başvurmaksızın, bu senaryonun da gösterdiği gibi, zamanın tümüyle beklenmedik bu özelliği doğrudan ışığın hızının sabit olmasından kaynaklanmaktadır. Işığın hızı sabit olmasaydı dayavaş hareket eden toplara ve kartoplarına dayalı sezgilerimizin bize düşündürdüğü gibi hareket ediyor olsaydı, platformdaki gözlemcilerin trendeki gözlemcilerle aynı fikirde olacağını hatırlatırım. Platformdaki bir gözlemci yine fotonların Geriülke'nin başkanına ulaşmak için, İleriülke'nin başkanına ulaşmak için olduğundan daha uzun bir mesafe kat etmesi gerektiğini iddia ederdi. Ancak sezgi, Geriülke'nin başkanına yaklaşmakta olan ışığın, ileri doğru giden tren tarafından "itildiği" için daha hızlı yol alacağını söyler. Aynı şekilde bu gözlemciler, İleriülke'nin başkanına yaklaşmakta olan ışığın trenin hareketiyle "geriye çekilip" daha yavaş yol aldığını da görürdü. Bu (hatalı) etkiler dikkate alındığında, platformdaki gözlemciler ışık demetlerinin iki başkana da aynı anda ulaştığını görecekti. Fakat gerçek hayatta ışık hızlanmaz ve yavaşlamaz, hızı artırılamaz ve azaltılamaz. O yüzden de platformdaki gözlemciler haklı olarak ışığın önce İleriülke'nin başkanına ulaştığını iddia edecektir.

Işık hızının sabit olması, eşzamanlılığın, hareket hallerinden bağımsız olarak herkesin hemfikir olduğu evrensel bir kavram olduğu yönündeki asırlık kavrayıştan vazgeçmemizi gerektirir. Dünya'da, Mars'ta, Jüpiter'de, Andromeda galaksisinde, kozmosun her köşesinde sakin sakin aynı saniyeleri vurduğu hayal edilmiş olan evrensel saat yoktur. Tam tersine, göreli hareket halindeki gözlemciler, hangi olayların aynı anda olduğu konusunda görüş

ayrılığına düşecektir. Bir daha tekrarlayalım, bu sonucun -yaşadığımız Dünyanın gerçek bir özelliği- bu kadar yadırgatıcı olmasının sebebi, gündelik hayatta karşılaşılan türden hızlar söz konusu olduğunda ortaya çıkan etkilerin son derece küçük olmasıdır. Müzakere masası 30 metre uzunluğunda olsaydı, tren de saatte 16 kilometre hızla hareket ediyor olsaydı, platformdaki gözlemciler ışığın İleriülke'nin başkanına Geriülke'nin başkanından saniyenin milyarda birinin milyonda biri kadar daha önce ulaştığını "görecekti". Bu gerçek bir farklılık olsa da o kadar küçüktür ki insan duyuları tarafından doğrudan algılanamaz. Tren hatırı sayılır ölçüde daha hızlı gidiyor olsaydı, diyelim ki saatte 900 milyar kilometre hızla hareket etseydi, platformda duran birinin bakış açısına göre ışığın Geriülke'nin başkanına ulaşması İleriülke'nin başkanına ulaşmasından 20 kat daha uzun sürecekti. Özel göreliliğin çarpıcı etkileri, yüksek hızlarda daha belirgin hale gelir.

Zaman Üzerindeki Etki: II. Kısım

Zamanın soyut bir tanımını yapmak zordur; bu tür tanımlar genellikle ya eninde sonunda "zaman" sözcüğünü kullanmak zorunda kalır ya da sırf bundan kaçınabilmek için dili çarpıtır. Böyle bir yol izlemektense, pragmatik bir bakış açısı benimseyip zamanı saatlerle ölçülen şey olarak tanımlayabiliriz. Ama bu sefer de tanım yükü "saat" sözcüğüne kayıyor. Bu noktada biraz gevşek bir tutum benimseyip saati hareket döngülerinin düzeni hiç değişmeyen bir aygıt olarak düşünebiliriz. Zamanı, saatimizin yaptığı döngüleri sayarak ölçeriz. Kol saati bu tanıma uyar, düzenli döngülerle hareket eden kolları vardır. Gerçekten de, seçilen olaylar arasında geçen zamanı saatin kollarının yaptığı döngüleri (ve bu döngülerin bölümlerini) sayarak ölçeriz.

"Hareket döngülerinin düzeni hiç değişmeyen" ifadesi, örtük bir biçimde zaman kavramını içeriyor, çünkü "düzen" sözcüğü her döngünün tamamlanması için geçen sürenin eşit olduğunu ifade ediyor. Pratik bir bakış açısıyla bu sorunu, döngüsel hareketlerini bir döngüden diğerine hiçbir biçimde değişmeyecek şekilde tekrarlamasını beklediğimiz, basit fiziksel bileşenlerden saatler

yaparak hallederiz. İleri geri sallanan sarkaçları olan saatler, tekrarlayan atomik süreçlere dayalı atom saatleri birer örnektir.

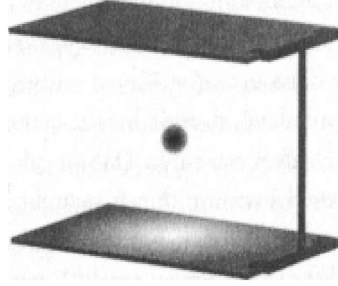
Hedefimiz hareketin zamanın geçişini nasıl etkilediğini anlamak; zamanı işlevsel olarak saatler üzerinden tanımladığımız için de sorumuzu "hareket saatlerin 'tıklamasını' nasıl etkiler" şeklinde değiştirebiliriz. En baştan, tartışmamızın bir saatin mekanik bileşenlerinin sert bir hareketten kaynaklanabilecek sarsıntılara nasıl tepki vereceğiyle ilgili olmadığını vurgulayalım. Aslına bakarsanız, sadece en basit hareket türünü -mutlak olarak sabit hız ve doğrultudaki hareketi- hesaba katacağız, dolayısıyla herhangi bir sarsıntı söz konusu olmayacak. Daha doğrusu, hareketin zamanın geçişini nasıl etkilediği ve dolayısıyla tasarımlarından ve yapılarından bağımsız olarak *bütün* saatlerin tıklamasını temelde nasıl etkilediği yönündeki evrensel soruyla ilgileniyoruz.

İşte bu amaçla, dünyanın kavramsal olarak en basit (ama uygulanırlığı olmayan) saatini kullanacağız. Bu saat "ışık saati" olarak bilinir ve birbirine bakan iki küçük ayna ile onların arasında gidip gelen tek bir fotondan oluşur (Şekil 2.1). Aynalar birbirinden yaklaşık 15 santimetre uzak olursa, fotonun iki ayna arasında bir kere gidip gelmesi saniyenin milyarda biri kadar sürecektir. Işık saatinin bir kere "tıklaması" fotonun iki ayna arasında bir kere gidip gelmesi olarak düşünülebilir; bir milyar tıklama bir saniyenin geçtiği anlamına gelecektir.

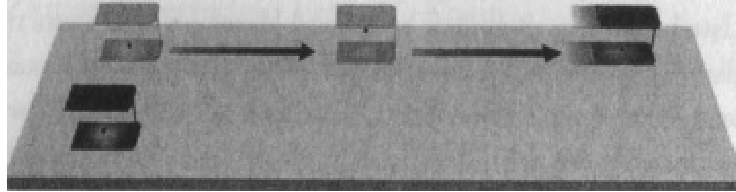
Işık saatini, olaylar arasında geçen zamanı ölçmek için bir kronometre gibi de kullanabiliriz. İlgilendiğimiz süre boyunca saatin kaç kez tıkladığını sayarız, sonra bunu bir tıklamaya denk gelen zamanla çarparız. Örneğin bir at yarışı için zaman tutuyorsak, yarışın başlaması ile bitmesi arasında totonun 55 milyar kere gidip geldiğini saydıysak, yarışın 55 saniye sürdüğü sonucuna varabiliriz.

Tartışmamızda ışık saatini kullanmamızın sebebi, ışık saatinin mekanik basitliğinin konuyla doğrudan ilgisi olmayan ayrıntıları ayıklayıp hareketin zamanın geçişini nasıl etkilediğine dair bize en açık kavrayışı sunmasıdır. Hareketin zamanın geçişini nasıl etkilediğini anlayabilmek için, yakınınızdaki bir masada duran bir ışık

saatinin tıklamasına bakarak tembel tembel zamanın geçişini seyrettiğinizi düşünün. Sonra birden, ikinci bir ışık saati masanın üzerinde sabit bir hız ve doğrultuda kaymaya başlıyor (Şekil 2.2). Sorduğumuz soru şudur: Acaba hareket halindeki ışık saati, duran ışık saatiyle aynı hızda mı tıklayacak?



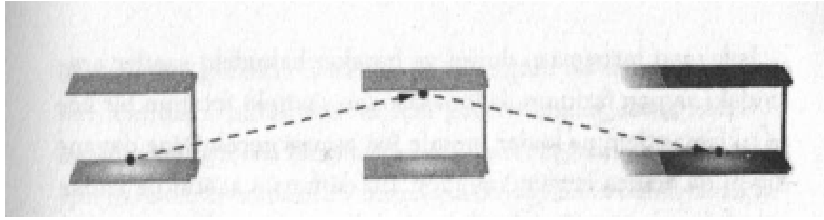
Şekil 2.1 Bir ışık saati birbirine paralel iki aynayla onların arasında gidip gelen bir fotondan oluşur. Foton iki ayna arasında bir kere gidip geldiğinde saat bir kere "tıklamış" olur.



Şekil 2.2 Öndeki ışık saati hareketsiz, ikinci ışık saatiyse sabit bir hızla kayıyor.

Bu soruyu cevaplayabilmek için kayan saatteki fotonun bir tıklamayı tamamlayabilmek için izlemesi gereken yolu, bizim bakış açımıza göre, gözümüzün önüne getirelim. Şekil 2.2'de görüldüğü üzere foton hareketine kayan saatin tabanından başlar, sonra üstteki aynaya doğru hareket eder. Fakat saat bizim bakış açımıza göre hareket ettiğinden foton Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bir açıyla hareket etmelidir. Foton bu yolu izlemezse üstteki aynayı tutturamaz, uzaya uçup gider. Kayan saat kendisinin durduğunu, diğer her şeyin hareket ettiğini iddia etme hakkına sahip olduğu için fotonun üstteki aynaya *çarpacağını* biliyoruz, yani dolayısıyla çizdiğimiz yol doğru. Foton üstteki aynaya çarptıktan sonra yine diyagonal bir yol izleyip

alttaki aynaya çarpar ve kayan saat bir tıklamasını tamamlamış olur. Basit fakat temel nokta şudur: Fotonun aldığını gördüğümüz iki diyagonal çizgiden oluşan yol, duran saatteki fotonun yukarıya ve aşağıya doğru aldığı yoldan daha *uzundur.* Kayan saatteki foton yukarıya ve aşağıya doğru yol almak dışında bir de, bizim bakış açımıza göre, sağa doğru hareket etmelidir. Dahası ışık hızının sabit oluşu bize kayan saatteki fotonun, duran saatteki fotonla tam olarak aynı hızda yol aldığını söyler. Fakat bir tıklamayı tamamlamak için daha uzun bir mesafe alması gerektiği için tıklama *sıklığı daha az* olacaktır. Bu basit düşünce hareket halindeki ışık saatinin, bizim bakış açımıza göre, duran ışık saatinden daha yavaş tıkladığını gösteriyor. Tıklama sayısının ne kadar zaman geçtiğini doğrudan yansıttığını kabul ettiğimiz için de, hareket halindeki saat için zamanın geçişinin yavaşladığını görürüz.



Şekil 2.3 Bizim bakış açımıza göre, kayan saatteki foton diyagonal bir yol izler**.**

Bu durumun ışık saatlerine özel bir durumu mu yansıttığını, sarkaçlı saatler ve Rolex saatler için de geçerli olup olmadığını merak edebilirsiniz. Zaman böyle daha sıradan saatlerle ölçüldüğünde de yavaşlayacak mıdır? Cevap kesin bir evettir, görelilik ilkesini uygulayarak da bunu görebiliriz. Işık saatlerimizin tepelerine birer Rolex kol saati iliştirelim ve deneyi tekrarlayalım. Daha önce anlattığımız gibi, duran ışık saati ve tepesindeki Rolex aynı süreyi ölçecektir, Rolex'te her bir saniye geçişinde, ışık saati de bir milyar kere tıklamış olacaktır. Peki ya hareket halindeki ışık saatiyle ona iliştirilmiş Rolex? Hareket halindeki Rolex'in de tıklaması yavaşlayacak ve böylece Rolex iliştirilmiş olduğu ışık saatiyle aynı hızda mı olacak? Meseleyi daha net ortaya koyalım: Işık saati-Rolex İkilisinin dümdüz raylarda hiç sarsılmadan sabit bir hızla giden penceresiz bir tren kompartımanının zeminine sabitlenmiş olduğu

için hareket halinde olduğunu düşünün. Görelilik ilkesine göre, bu trendeki bir gözlemcinin trenin hareketinin herhangi bir etkisini gözlemesi mümkün değildir. Fakat eğer ışık saati ile Rolex'in hızları birbirlerinden farklı olacak olsaydı, bu gerçekten de fark edilebilir bir etki olurdu. Dolayısıyla hareket halindeki ışık saati ile ona iliştirilmiş Rolex'in ölçtüğü süre yine eşit *olmalıdır,* Rolex'in de tıpkı ışık saati gibi yavaşlaması *gerekir.* Markaları, tipleri, yapıları ne olursa olsun, göreli hareket halindeki saatler zamanın geçişini farklı hızlarda gösterir.

Işık saati tartışması, duran ve hareket halindeki saatler arasındaki zaman farkının, kaymakta olan saatteki fotonun bir kere tıklaması için ne kadar mesafe kat etmesi gerektiğine dayandığını da açıkça ortaya koyuyor. Bu da kayan saatin ne kadar çabuk hareket ettiğine bağlıdır; hareketsiz bir gözlemcinin bakış açısına göre, saat ne kadar hızlı kayıyorsa, fotonun sağa doğru o kadar uzun bir mesafe alması gerekir. Duran saate kıyasla, kayan saatin tıklama hızının, saat ne kadar hızlı hareket ederse o kadar azalacağı sonucuna varırız.

Bir ölçek duygusu kazanabilmek için, fotonun tek bir tıklamayı saniyenin milyarda biri kadar bir sürede tamamladığını hatırlayalım. Saatin bir tıklama kadar zamanda fark edilebilir bir mesafe kat edebilmesi için müthiş bir hızla, yani ışık hızına yakın bir hızla hareket ediyor olması gerekir. Saatte 16 kilometre gibi normal bir hızla hareket ediyorsa, bir tıklama tamamlanıncaya dek sağa doğru kat edeceği mesafe çok küçüktür; sadece 30 santimetrenin (1 feet) 15 milyarda biri kadardır. Kayan fotonun alması gereken ek mesafe de küçüktür ve dolayısıyla hareket halindeki saatin tıklama hızı üzerindeki etkisi de o kadar azdır. Yine görelilik ilkesine göre, bu bütün saatler için yani bizatihi zamanın kendisi için geçerlidir. Bizim gibi, böyle yavaş hızlarda göreli hareket eden varlıkların, zamanın geçişindeki çarpılmaların genellikle farkında olmamasının sebebi budur. Varlıkları kesin olsa da, bu etkiler inanılmaz derecede küçüktür. Öte yandan kayan saate tutunup onunla birlikte ışık hızının dörtte üçü kadar bir hızla hareket edebilseydik, özel görelilik denklemlerini kullanarak, hareketsiz gözlemcilerin bizim hareket halindeki saatimizin, onların saatlerinin tıklama hızının üçte ikisi

hızda tıkladığını göreceğini kanıtlamamız mümkün olabilirdi. Gerçekten de önemli bir etki.

Hayat Koşusu

Işık hızının sabit olmasının, hareket halindeki bir ışık saatinin duran bir ışık saatine kıyasla daha yavaş tıklayacağı anlamına geldiğini gördük. Görelilik ilkesine göre bu sadece ışık saatleri için değil bütün saatler için geçerli olmalı, hatta zamanın kendisi için geçerli olmalı. Zaman, hareket halindeki bir birey için hareketsiz haldeki bir birey için olduğundan dahayavaş geçer. Eğer bizi bu sonuca getiren hayli basit akıl yürütme doğruysa, o zaman örneğin hareket halindeki bir insanın, hareketsiz haldeyken yaşayacağından daha uzun süre yaşaması gerekmez mi? Ne de olsa, eğer zaman hareket halindeki bir birey için duran bir birey için olduğundan dahayavaş geçiyorsa, o zaman bu eşitsizlik sadece saatlerle ölçülen zaman için değil, kalp atışlarıyla ve vücut uzuvlarının çürümesiyle ölçülen zaman için de geçerli olmalı. İnsanların ömürlerinin uzunluğuna dair beklentileriyle değil, ama mikrodünyanın bazı parçacıklarıyla yani müonlarla dolaysız olarak doğrulanan durum *budur* işte. Fakat yeni bir gençlik kaynağı bulunduğunu iddia etmemizi engelleyen önemli bir problem var.

Müonlar laboratuvarda dururken, radyoaktif çürümeye hayli benzer bir süreçle, ortalama olarak saniyenin iki milyonda biri kadar bir sürede parçalanır. Bu parçalanma çok (azla kanıtla da desteklenen deneysel bir olgudur. Bir müon sanki kalasına silah dayalı bir halde yaşıyor gibidir: Ömrü saniyenin iki milyonda birine ulaştığında tetik çekilir, müon elektronlara ve nöt-rinolara ayrılır. Fakat bu müonlar laboratuvarda durmuyor da, parçacık hızlandırıcı diye bilinen ve ışık hızından biraz daha düşük bir hızla hareket etmelerini sağlayan bir cihazın içinde ilerliyor olsalar, laboratuvardaki bilim insanlarının ölçümlerine göre ortalama ömürleri ciddi miktarda uzar. *Gerçekten de* böyle olur. Saatte 667 milyon mil (ışık hızının yüzde 95'i) hızla giden müonun ömrünün 10 kat arttığı görülür. Özel göreliliğe göre bu şöyle açıklanır: Müonların taktığı "kol saatleri" laboratuvardaki saatlerden daha yavaş tıklamaktadır; dolayısıyla

laboratuvar saatleri müonların tetiği çekip patlamış olması gerektiğini söylerken, hızla hareket eden müonların saatleri daha ölüm vaktinin geldiğini göstermez. Bu, hareketin zamanın geçişi üzerindeki etkisini çok doğrudan, çarpıcı bir biçimde gösterir. İnsanlar bu müonlar kadar hızlı hareket edecek olsalardı, ömürleri aynı oranda artardı. 70 yıl yaşamak yerine 700 yıl yaşarlardı.

Şimdi şu problemli noktaya gelelim. Laboratuvardaki gözlemciler hızla hareket eden müonların hareketsiz haldeki kuzenlerine kıyasla daha uzun yaşadığını görse de, bunun sebebi hareket halindeki müonlar için *zamanın daha yavaş geçmesidir.* Zamanın bu şekilde yavaşlaması, yalnızca müonların taktıkları saatler için değil yapabilecekleri her şey için geçerlidir. Örneğin hareketsiz haldeki bir müon kısa ömrü boyunca 100 kitap okuyabiliyorsa, hızla hareket eden kuzeni de 100 kitap okuyabilir, çünkü hareketsiz haldeki müondan daha uzun yaşıyor gibi görünse de -hayatındaki diğer her şey gibi- okuma hızı da yavaşlamıştır. Laboratuvarın bakış açısına göre, hareket halindeki müon hayatını ağır çekim yaşıyor gibidir. Bu bakış açısına göre hareket halindeki müon hareketsiz haldeki müondan daha uzun yaşayacaktır; fakat geçireceği "ömrün uzunluğu" hareketsiz haldeki müonun ömrüyle tamamen aynı uzunlukta olacaktır. Aynı şey hızlı hareket ettikleri için yaşam sürelerinin yüzyılları bulması beklenen, insanlar için de geçerlidir. *Onların* bakış açısına göre hayat her zamanki gibidir. Bizim bakış açımıza göreyse hayatı iyice yavaş yaşamaktadırlar, dolayısıyla onların normal bir hayat döngüsü *bizim* çok fazla *zamanımızı* alır.

Kim Hareket Ediyor?

Hareketin göreliliği hem Einstein'ın kuramını anlamanın anahtarıdır, hem de kafa karışıklığına yol açması olasıdır. Bakış açılarının ters çevrilmesinin, saatlerinin yavaş çalıştığını savunduğumuz "hareketli" müonlarla "hareketsiz" müonlar arasında bir rol değişimine yol açtığını fark etmişsinizdir. Nasıl George da Gracie de kendilerinin durduğunu, diğerinin hareket ettiğini iddia etmekte aynı derecede haklıysa, hareket halinde diye tanımladığımız müonlar da kendi bakış açılarına göre, kendilerinin hareketsiz

olduğunu, "hareketsiz" müonların ters yönde hareket ettiğini iddia etmekte sonuna kadar haklıdır. Sunduğumuz savlar bu bakış açısı için de aynı ölçüde geçerlidir; hareketsiz müonlar dediğimiz müonların taktığı saatlerin, hareket halinde diye tanımladığımız müonların saatlerine kıyasla dahayavaş hareket ettiği yönünde, görünüşte tam tersi bir sonuca varılabilir.

Böyle bir durumla daha önce de karşılaşmıştık; ampul kullanılan imza töreninde farklı bakış açıları taban tabana zıtmış gibi görünen sonuçlar doğurmuştu. O durumda özel göreliliğe dayalı temel akıl yürütme bizi, hareket halinden bağımsız olarak, hangi olayların aynı anda gerçekleştiğine dair herkesin hemfikir olduğu yönündeki kökleşmiş fikirden vazgeçmeye zorlamıştı. Fakat bu uyuşmazlık daha da betermiş gibi görünüyor. Nasıl olur da, gözlemcilerin ikisi de diğerinin saatinin dahayavaş çalıştığını iddia eder? Daha da önemlisi, müonların farklı fakat aynı ölçüde geçerli bakış açılarına göre, iki grubun da diğer grubun daha önce öleceği iddiasında bulunacağı sonucuna varıyoruz. Dünya'nın beklenmedik bazı tuhaf özelliklere sahip olabileceğini öğreniyoruz, fakat öğrendiklerimizin mantıksal saçmalık sınırını aşmayacağını umuyoruz. Peki o halde nedir bu olup biten?

Özel görelilikten doğan bütün görünüşteki paradokslar gibi, bu mantıksal ikilemler de yakından incelenip çözüldüklerinde evrenin işleyişine dairyeni bilgileri gözler önüne seriyor. Müonlara insanlara ait özellikler atfetmeyi bir kenara bırakıp uzay elbiselerinde yanıp sönen ışıkların yanı sıra artık bir de parlak dijital saatler taşıyan George ile Gracie ye dönelim. George'un bakış açısına göre, Gracie yanıp sönen yeşil ışığı ve büyük dijital saatiyle uzakta belirip sonra boş uzayın karanlığında yanından geçip giderken, kendisi hareketsizdir. Gracie'nin saatinin kendisininkine göre daha yavaş çalıştığını fark eder (saatin yavaşlama hızı birbirlerinin yanından ne kadar hızlı geçtiklerine bağlıdır). George biraz daha akıllı olsa, Gracie'nin saatindeki zamanın geçiş hızının yanı sıra Gracie'deki her şeyin -geçerken el sallamasının, gözünü kırpma hızının vs.- ağır çekimde gerçekleştiğini fark edebilirdi. Gracie'nin bakış açısından da aynı gözlemler George için geçerlidir.

Her ne kadar paradoksal görünse de mantıksal bir saçmalığı gözler önüne serecek kesin bir deney gerçekleştirmeye çalışalım. En basiti, her şeyi öyle düzenleyelim ki George ile Gracie birbirlerinin yanından geçerken saatlerini 12:00'a ayarlasınlar. Birbirlerinden uzaklaşırlarken, ikisi de diğerinin saatinin yavaş işlediğini iddia edecektir. Bu uyuşmazlığı hemen çözmek için George ile Gracie yeniden bir araya gelip geçen zamanı, saatlerinin gösterdiği üzere, doğrudan karşılaştırmalıdır. Peki ama bunu nasıl yapabilirler? Tamam, George'un kendi bakış açısına göre Gracie yi yakalamak için kullanabileceği tepkili bir motoru var. Ama motorunu kullanırsa, bu paradoksun sebebi olan iki bakış açısının simetrisi bozulacaktır, çünkü o zaman George'un hareketi *ivmeli yani* kuvvetten bağımsız olmayan bir hareket olacaktır. O şekilde yeniden bir araya geldiklerinde George'un saatine göre gerçekten de daha az zaman geçmiş olacaktır; George şimdi kesinlikle hareket halinde olduğunu söyleyebilir, çünkü bunu hissedebilmiştir. George ile Gracie'nin bakış açıları artık simetrik değildir. George tepkili motorunu çalıştırarak hareketsiz olma iddiasından vazgeçmiştir.

George bu şekilde Gracie'nin peşinden giderse, saatlerinin göstereceği zaman farkı, ikisinin göreli hızlarına ve hareket doğrultularına ve George'un tepkili motorunu nasıl kullandığına bağlı olacaktır. Artık bildiğimiz gibi, söz konusu hızlar küçükse aradaki zaman farkı da çok az olacaktır. Ama ışık hızına yakın hızlar söz konusuysa, zaman farkı dakikaları, günleri, yılları, yüzyılları hatta daha fazlasını bulabilir. Somut bir örnek olsun diye George ile Gracie'nin birbirlerinin yanlarından geçip sonra da uzaklaşırlarkenki hızlarının, ışık hızınınyüzde 99,5'ine eşit olduğunu düşünelim. Ayrıca diyelim ki George saatine göre üç yıl bekledikten sonra tepkili motorunu ateşliyor ve birbirlerinden ayrıldıkları hızla, yani ışık hızınınyüzde 99,5'i bir hızla Gracie ye yaklaşmaya başlıyor. Gracieye ulaştığında George'un saatine göre altı yıl geçmiş olacaktır, çünkü Gracieyi yakalaması üç yıl sürecektir. Gelgelelim özel görelilik kuramı Gracie'nin saatine göre *60*yıl geçeceğini söyler. Bu bir el sürçmesi değil: Gracie'nin uzayda George'un yanından geçtiğini hatırlaması için hafızasını yoklaması, 60 yıl öncesini hatırlaması gerekecektir. Öte yandan George'a göre bu sadece altı yıl önce

olmuştur. George'un hareketi onu gerçek anlamda zamanda bir seyyah yapmıştır, çok da somut bir biçimde üstelik: George Gracie'nin geleceğine seyahat etmiştir.

Doğrudan karşılaştırmak için iki saati bir araya getirmek lojistik bir sıkıntıdan ibaret görünebilir, ama aslında meselenin özüdür. Paradoksun zırhındaki bu çatlağın üstesinden gelmek için çok çeşitli hileler düşünebiliriz, ama sonunda hepsi de başarısız olur. Mesela George ile Gracie saatlerini, bir araya getirerek değil de cep telefonlarını kullanarak kıyaslasalar nasıl olur? Eğer cep telefonuyla iletişim "anında" bir iletişim türü olsaydı, başa çıkılamayacak kadar büyük bir tutarsızlıkla karşı karşıya kalırdık: Gracie'nin bakış açısıyla akıl yürütecek olursak, George'un saati ağır işlemektedir, buyüzden de George daha az zaman geçtiğini söylemelidir; George'un bakış açısıyla akıl yürütecek olursak da Gracie'nin saati ağır işlemektedir, bu yüzden de Gracie daha az zaman geçtiğini söylemelidir. İkisi de haklı olamaz, biz de batarız. Tabi burada kilit nokta, bütün iletişim araçları gibi cep telefonlarının da sinyalleri anında göndermemesidir. Cep telefonları ışığın bir biçimi olan radyo dalgalarıyla işler, dolayısıyla gönderdikleri sinyaller de ışık hızıylayol alır. Yani sinyallerin alınması zaman alır; aslında iki bakış açısını birbiriyle uyumlu kılacak bir gecikmedir bu.

Gelin bu duruma önce George'un bakış açısından yaklaşalım. Diyelim ki, George her saat başı cep telefonuyla Gracie'ye "Saat on iki\her şey yolunda", "Saat bir, her şey yolunda" diye mesaj gönderiyor. Onun bakış açısına göre Gracie'nin saati yavaş işlediği için, ilk başta Gracie'nin bu mesajları, saati daha saat başını göstermeden alacağını düşünüyor. Böylece de Gracie'nin, yavaş işleyen saatin kendi saati olduğunu kabul etmek zorunda kalacağı sonucuna varıyor. Ama sonra yeniden düşünüyor: "Gracie benden uzaklaştığına göre cep telefonuyla gönderdiğim sinyaller ona ulaşmak için her seferinde daha uzun bir mesafe kat etmek zorunda. Belki bu ek süre, onun saatinin yavaşlığını telafi eder." George, birbirine ters düşen etkiler olduğunu -Gracie'nin saatinin yavaşlığına karşı kendisinin gönderdiği sinyalin Gracieye ulaşma süresi-anlayınca oturup bunların bileşik etkisini niceliksel olarak hesaplar.

Bulduğu sonuç şu olur: Gönderdiği sinyalin Gracieye ulaşma süresi, Gracie'nin saatinin yavaşlığını *telafi etmenin de ötesine geçecektir.* Şaşırtıcıdır ama Gracie, George'un kendi saatine göre 1 saatin geçtiğini belirten mesajlarını, belirlenmiş o vaktin kendi saatine göre geçip gitmesinden *sonra* alacaktır. Aslına bakarsanız George, Gracie'nin fizik konusunda uzman olduğunu bildiği için, Gracie'nin cep telefonuna gelen mesajlara dayanarak George'un saatine dair çıkarımlarda bulunurken, sinyalin kendisine ulaşma süresini hesaba katacağını da bilmektedir. Biraz daha hesap yaptıktan sonra görür ki, Gracie sinyallerin kendisine ulaşma süresini hesaba katsa dahi, Gracie'nin George'un yolladığı sinyallerle ilgili analizinin, onu George'un saatinin kendi saatinden dahayavaş çalıştığı sonucuna getireceğini görür.

Aynı mantık, Gracie'nin bakış açısını dikkate alıp bu kez onun her saat başı George'a sinyal gönderdiğini düşündüğümüzde de geçerlidir. Onun bakış açısına göre George'un saati yavaş olduğundan, ilk başta George'un, onun gönderdiği saat başı mesajlarını, kendi mesajlarını göndermeden önce alacağını düşünür. Ama, karanlıkta yolladığı sinyallerin giderek uzaklaşan George'a ulaşmak için her seferinde daha uzun bir mesafe kat etmesi gerektiğini dikkate aldığında, George'un aslında bu mesajları kendi mesajlarını gönderdikten *sonra* alacağını fark eder. Gracie, sinyallerin kendisine ulaşma süresini dikkate alsa da George'un, Gracie'nin gönderdiği mesajlardan Gracie'nin saatinin kendi saatinden dahayavaş işlediği sonucuna varacağını görür.

George da Gracie de hızlarını değiştirmedikleri sürece ikisinin de bakış açısı aynıdır. Bu paradoksal görünse de, bu şekilde, ikisinin de diğerinin saatinin yavaş işliyor olduğunu düşünmesinin son derece tutarlı olduğunu fark edeceklerdir.

Hareketin Uzay Üzerindeki Etkisi

Biraz önceki tartışmamız, gözlemcilerin hareket eden saatlerin kendi saatlerinden daha yavaş tıkladığını gördüğünü, yani zamanın hareket tarafından etkilendiğini açığa çıkardı. Buradan hemen

hareketin uzay üzerinde de aynı derecede büyük bir etkisi olduğunu görebiliriz. Yarış sahasındaki Slim ile Jim'e dönelim. Daha önce de söylediğimiz gibi Slim, galeride yeni otomobilinin uzunluğunu bir metreyle dikkatle ölçmüştü. Slim yarış sahasında hız yaparken Jim otomobilin uzunluğunu ölçmek için bu yöntemi kullanamaz, dolayısıyla dolaylı bir yol izlemek zorundadır. Daha önce de söylediğimiz gibi bu yollardan biri şudur: Jim otomobilin ön tamponu kendisine ulaştığında kronometresini çalıştırır, arka tamponu tam önünden geçtiğinde de durdurur. Arada geçen zamanı otomobilin hızıyla çarparak otomobilin uzunluğunu bulabilir.

Zamanın inceliklerine dair yeni edindiğimiz bilgiyi kullanırsak, Slim'in bakış açısına göre, Slim duruyorken Jim'in hareket halinde olduğunu, dolayısıyla Slim'e göre Jim'in saatinin yavaş işlediğini görürüz. Sonuç olarak Slim, Jim'in yaptığı dolaylı ölçüm sonucunda otomobilin uzunluğunun kendisinin galeride yaptığı ölçümden *daha kısa* çıkacağını anlar; çünkü Jim hesap yaparken (hız çarpı aradan geçen zaman eşittir uzunluk) aradan geçen zamanı yavaş işleyen bir saatle ölçecektir. Saat yavaş işliyorsa, Jim'e göre aradan geçen zaman daha az olacak, dolayısıyla yaptığı hesap sonucunda da otomobilin uzunluğu Slim'in ölçtüğünden daha kısa çıkacaktır.

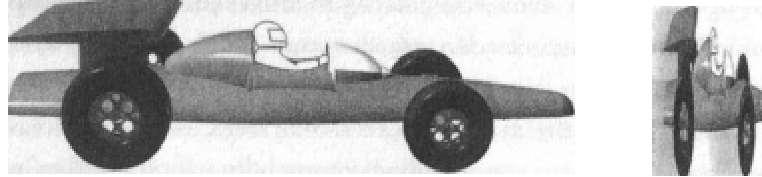
Başka bir deyişle Jim, Slim'in otomobilinin uzunluğunun, otomobil hareket halindeyken duruyorken ölçüldüğünden daha kısa olduğunu görecektir. Bu genel bir olguya örnektir: Gözlemciler hareket halindeki bir nesneyi hareket doğrultusunda kısalmış olarak algılar. Örneğin özel görelilik denklemlerine göre, bir nesne ışık hızınınyüzde 98'i kadar bir hızla hareket ediyorsa, duran bir gözlemci bu nesneyi, o nesne duruyor olsaydı göreceğinden yüzde 80 daha kısa görecektir. Bu olgu şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Uzay-zamanda Hareket

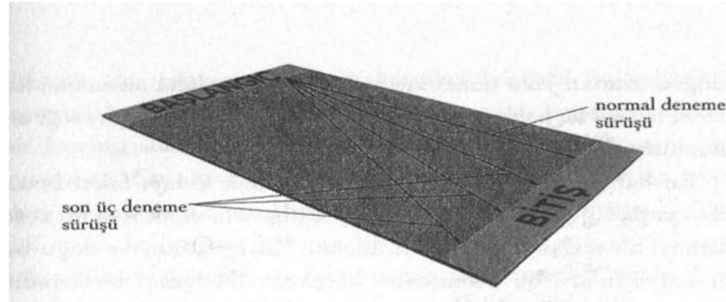
Işık hızının sabit olması, uzayı ve zamanı katı ve nesnel yapılar olarak gören geleneksel bakış açısının yerini, onları gözlemci ile gözlenen arasındaki göreli harekete yakından bağlı gören yeni bir kavrayışın almasına yol açmıştır. Hareket halindeki nesnelerin ağır

çekimde hareket ettiğini ve kısaldığını anlamış olduğumuza göre, tartışmayı burada bitirebilirdik. Fakat özel görelilik, bütün bu olguları içine alacak daha derin ve bütünleşik bir bakış açısı sunmaktadır.

Bu bakış açısını anlayabilmek için, aslında var olması imkânsız bir otomobil düşünelim; bu otomobil saatte 100 kilometrelik seyir hızına hemen ulaşıyor, sonra da motoru duruncaya dek hızını hiç artırıp azaltmadan aynen koruyor. Diyelim ki, yetenekli bir sürücü olarak ün kazandığı için Slim'den bu araçla bir çölün ortasındaki bir düzlükte yer alan uzun, düz ve geniş bir parkurda deneme sürüşü yapması isteniyor. Başlangıç ve bitiş çizgileri arasındaki mesafe 10 kilometre olduğundan otomobilin bu mesafeyi bir saatin onda biri kadar bir sürede, yani altı dakikada alması gerekir. Otomobillerden de anlayan Jim, birçok deneme sürüşünden elde edilen verileri inceliyor ve çoğu sürüşün 6 dakikada tamamlanmış olduğunu görüyor. Ama son birkaç tanesinin hayli uzun, 6,5, 7 hatta 7,5 dakika sürmüş olması kafasına takılıyor. Başta mekanik bir sorun olabileceğini düşünüyor, çünkü bu veriler son üç sürüşte otomobilin saatte 100 kilometreden daha yavaş seyrettiğine işaret ediyormuş gibi görünüyor.



Şekil 2.4 Hareket eden bir nesne hareket doğrultusunda kısalır.



Şekil 2. 5 Öğleden sonra güneş gözünü aldığı için, Slim son üç deneme sürüşünde otomobilini giderek artan bir açıyla sürmüştür.

Fakat otomobili iyice incelediğinde mükemmel durumda olduğu kanısına varıyor. Deneme sürüşlerinin normalden uzun sürmesini açıklayamadığından Slim'le konuşup son sürüşlerle ilgili bilgi alıyor. Slim konuya gayet basit bir açıklama getiriyor. Jim'e parkurun doğudan batıya doğru uzandığını, günün ilerleyen saatlerinde güneşin gözünü aldığını, son üç sürüşte durum iyice kötüleştiğinden otomobili parkurun bir ucundan diğerine hafif bir açıyla sürdüğünü anlatıyor. Son üç sürüşte izlediği yolu, şekil 2.5'te de görüldüğü gibi, kaba taslak çiziyor. Son üç deneme sürüşünün neden daha uzun sürdüğü şimdi gayet açık: Başlangıç çizgisiyle bitiş çizgisi arasındaki yol bir açıyla kat edilirse daha uzun olur, dolayısıyla bu yolu saatte 100 kilometre hızla kat etmek daha fazla zaman alır. Başka bir deyişle bir açıyla yol alırsanız, saatte 100 kilometrelik hızın bir kısmı güneyden kuzeye doğru giderken harcanacak, böylece doğudan batıya doğru uzanan yolu tamamlamak için biraz daha az zaman kalacaktır. Bu da parkuru bitirmenin biraz daha uzun süreceği anlamına gelir.

Bu haliyle Slim'in açıklamasını anlamak kolay; fakat birazdan yapacağımız kavramsal sıçrayışa hazırlanmak için bu açıklamayı biraz daha farklı ifade edelim. Kuzey-güney ve doğu-batı doğrultuları, bir otomobilin hareket edebileceği birbirinden bağımsız iki uzamsal boyuttur. (Otomobil dikey de hareket edebilir, dağda bir geçit aşarken örneğin, ama burada bu yetiye ihtiyacımız yok.) Slim'in açıklaması, otomobilin bütün deneme sürüşlerinde saatte 100 kilometre hızla hareket ettiği halde son üç sürüşte bu hızı iki boyut arasında paylaştırdığını, dolayısıyla doğu-batı doğrultusunda saatte 100 kilometreden daha yavaş gidiyormuş gibi göründüğünü gösteriyor. Daha önceki deneme sürüşlerinin hepsinde saatte 100 kilometrelik hızın tamamı do-ğubatı doğrultusundaki harekete harcanmış, son üç sürüşteyse bu hızın bir bölümü kuzey-güney doğrultusundaki hareket için harcanmıştır.

Einstein, özel görelilik fiziğinin temelinde tam da bu fikrin -hareketin farklı boyutlar arasında paylaştırılmasının- yattığını buldu; bir nesnenin hareketini sadece uzamsal boyutların değil *zaman* boyutunun da paylaştığını kavramamız koşuluyla ama. Aslına

bakarsanız, çoğu koşulda, bir nesnenin hareketinin *büyük bölümü* zaman içindedir, uzay içinde değil. Gelin bunun ne anlama geldiğini görelim.

Uzayda hareket, hayatın ilk yıllarında öğrendiğimiz bir kavramdır. Genellikle bu bağlamda düşünmesek de kendimizin, arkadaşlarımızın, bize ait olan şeylerin *zaman içinde de hareket ettiğini* öğreniriz. Tembel tembel oturup televizyon seyrederken bile bir duvar saatine ya da kol saatine baktığımızda saatin sürekli değiştiğini, sürekli "zaman içinde ileriye doğru gittiğini" görürüz. Kendimiz ve etrafımızdaki her şey kaçınılmaz olarak zaman içindeki bir andan bir sonraki ana geçerek yaşlanıyoruz. Aslına bakarsanız matematikçi Hermann Minkowski -sonunda Einstein da- zamanın, evrenin kendimizi içinde bulduğumuz uzamsal üç boyutuna bazı bakımlardan hayli benzeyen başka bir boyutu -dördüncü boyutu- olduğunun düşünülmesini savunmuştu. Kulağa soyut gelse de, bir boyut olarak zaman kavramı aslında somuttur. Biriyle buluşacağımızda o kişiye kendisini "uzayda" nerede bekleyeceğimizi söyleriz; mesela 53. sokakla 7. caddenin köşesindeki binanın dokuzuncu katında. Burada evrenin uzamsal üç boyutunda belirli bir yeri yansıtan üç ayrı bilgi var (dokuzuncu kat, 53. sokak, 7. cadde). Fakat o kişiyle *ne zaman* buluşacağımızı belirtmemiz de aynı derecede önemlidir; mesela öğleden sonra üçte. Bu bilgi de buluşmamızın "zamanda" nerede gerçekleşeceğini söyler. Dolayısıyla olaylar dört bilgiyle tanımlanır: Uzayla ilgili üç, zamanla ilgili bir bilgi. Bu verilerin olayın uzay ve zamandaki, yani kısacası *uzay-zamandakiyerini* belirttiği söylenir. Bu anlamda zaman diğer bir boyuttur.

Bu görüş, uzay ve zamanın farklı boyut örnekleri olduğunu iddia ettiğine göre, bir nesnenin uzaydaki hızından bahsettiğimize benzer şekilde zamandaki hızından da bahsedebilir miyiz? Evet, bahsedebiliriz.

Bunu nasıl yapacağımıza dair önemli bir ipucunu, önceden karşılaşmış olduğumuz temel bir bilgide buluyoruz. Bir nesne uzayda bize göre hareket halindeyse, saati bizimkinden yavaş işler. Yani

zaman içindeki hareketinin hızı yavaşlar, işte sıçrama noktası: Einstein evrendeki bütün nesnelerin uzay-zamanda *her zaman* tek bir sabit hızla, ışık hızıyla yol aldığını iddia etmiştir. Tuhafbir fikirdir bu; nesnelerin ışık hızından hatırı sayılır derecede düşük hızlarda hareket ettiğini düşünmeye alışmı-şızdır. Gündelik hayatta görelilikten kaynaklanan etkilere aşina olmamamızın gerekçesi olarak bunu sık sık vurguladık. Bunların hepsi de doğrudur. Fakat şimdi, bir nesnenin dört boyuttaki -üç uzam, bir zaman- birleşik hızından bahsediyoruz; ışık hızına denk olan da bir nesnenin bu genel anlamdalyrihızıdır. Bunu daha iyi anlayabilmek ve önemini ortaya koyabilmek için, daha önce anlattığımız, gerçek hayatta karşılaşmamızın imkânsız olduğu tek hızlı otomobil örneğinde olduğu gibi, bu tek sabit hızın farklı boyutlar, yani farklı uzay *ve* zaman boyutları arasında paylaşılabileceğini belirtelim. Bir nesne duruyorsa (bize göre) ve buna bağlı olarak da uzayda hiç hareket etmiyorsa -otomobilin ilk deneme sürüşleriyle bir benzetme yapacak olur-sak- nesnenin bütün hareketi tek boyutta -bu durumda zaman boyutunda- yol almak için kullanılır. Ayrıca bize ve birbirlerine göre hareketsiz olan bütün nesneler zamanda tamı tamına aynı hızda hareket ederler yani yaşlanırlar. Gelgelelim bir nesne uzayda da hareket ederse, bu zamandaki hareketinin bir kısmının başka bir doğrultuya harcanması gerektiği anlamına gelir. Belli bir açıylayol alan otomobil örneğinde olduğu gibi, hareketin bu şekilde paylaşılması da -hareketin bir kısmı uzayda hareket etmek için kullanıldığı için- nesnenin zaman içinde durağan benzerlerine kıyasla dahayavaş hareket edeceği anlamına gelir. Yani, nesne uzayda hareket ederse saati dahayavaş işleyecektir. Daha önce de tam bunu bulmuştuk. Şimdi de, bir nesne bize göre hareket halindeyse zamanın yavaşlayacağını, çünkü o nesnenin zaman içindeki hareketinin bir bölümünü uzay içinde harekete yönelteceğini görüyoruz. Dolayısıyla bir nesnenin uzaydaki hızı, zaman içindeki hareketinin ne kadarının uzaydaki hareketine yöneltildiğinin bir yansımasıdır.

Bu çerçevenin, bir nesnenin uzaydaki doğrusal hızının bir sınırı olduğu gerçeğini de içerdiğini görüyoruz: Uzayda maksimum hız, ancak bir nesnenin zaman içindeki hareketinin *tamâmının* uzay

içinde harekete yöneltilmesi halinde mümkündür. Bu da ancak o nesnenin zamandaki aslında ışık hızında olan hareketinin tümünün, uzayda ışık hızında harekete yöneltilmesi halinde ortaya çıkar. Ancak bütün hareketini zaman içinde kullandığından, bu hız bütün nesnelerin uzayda ulaşabileceği *en yüksek* hızdır. Bu durum, otomobilimizin doğrudan kuzey-güney doğrultusunda denenmesine benziyor. Tıpkı otomobilin doğu-batı boyutunda hareket edecek hızının kalmayacak olması gibi, uzayda ışık hızında hareket eden bir nesnenin de zamanda hareket etmesini sağlayacak hızı kalmaz. Dolayısıyla ışık yaşlanmaz; Büyük Patlama'da ortaya çıkmış bir foton, bugün de o zamanki yaşındadır. Işık hızında zaman geçmez.

Peki ya $E=mc^2$?

Einstein kuramına "görelilik" kuramı denmesini önermediy-se de (başka şeylerin yanı sıra ışık hızının değişmezliğini yansıtmak üzere "değişmezlik" kuramı ismini önermişti) terimin anlamı artık gayet açıktır. Einstein'ın çalışmaları, önceden ayrı ve mutlak gibi görünen uzay ve zaman gibi kavramların, aslında iç içe geçmiş ve göreli olduğunu göstermiştir. Einstein ayrıca Dünyanın başka fiziksel özelliklerinin de beklenmedik biçimde iç içe geçmiş olduğunu göstermiştir. En ünlü denklemi, en önemli örneklerden birini ortaya koyar. Bu denklemde Einstein, bir nesnenin enerjisi *(E)* ile kütlesinin *(m)* bağımsız kavramlar olmadığını, bir nesnenin kütlesini biliyorsak enerjisini (kütleyi ışık hızıyla iki kere -c^2- çarparak), enerjisini biliyorsak da kütlesini (enerjiyi iki kere ışık hızına bölerek) hesaplayabileceğimizi ortaya koymuştur. Başka bir deyişle enerji ve kütle -dolar ve frank gibi- birbirine çevrilebilir para birimleridir. Fakat parayla olanın tersine, ışık hızının karesi olarak verilen değişim kuru her zaman, sonsuza kadar sabittir. Bu değişim kuru çok yüksek olduğundan (c^2 büyük bir sayıdır), küçük bir kütle çok büyük miktarda enerji üretir. Dünya 0,90 kilogramın yüzde 1'inden daha az miktarda uranyumun enerjiye dönüşmesinin doğurduğu yıkıcı gücü Hiroşima'da görmüştür. Bir gün Einstein'ın formülünden verimli bir şekilde yararlanarak nükleer reaktörlerde gerçekleştirilecek füzyonlar

sayesinde, bütün dünyanın enerji talebini sonu gelmez deniz suyu kaynaklarımızdan karşılayabiliriz.

Bu bölümde vurguladığımız kavramlar açısından Einstein'ın denklemi, bize temel bir gerçeğin, hiçbir şeyin ışık hızından daha hızlı gidemeyeceği gerçeğinin en somut açıklamasını sunmaktadır. Örneğin, neden bir nesneyi, diyelim ki bir hızlandırıcıda hızı saatte ışık hızınınyüzde 99,5'ine çıkartılmış bir müonu alıp "biraz daha iterek" hızını ışık hızının yüzde 99,9'una yükseltip sonra bir daha *"gerçekten* hızla itip" ışık hızı sınırını aşmasını sağlayamıyoruz, diye düşünmüş olabilirsiniz. Einstein'ın formülü bu tür çabaların neden başarıya ulaşmayacağını açıklıyor. Bir şey ne kadar hızlı hareket ederse enerjisi o kadar artar, yine Einstein'ın formülünden bir şey ne kadar çok enerjiye sahipse, kütlesinin de o kadar artacağını görüyoruz. Örneğin ışık hızınınyüzde 99,9'u bir hızla hareket eden müonlar durmakta olan kuzenlerinden çok çok daha ağırdır. Aslında tam 22 kat daha ağırdırlar. (Tablo 1.1'de verilen kütleler duran parçacıklar içindir.) Ama bir nesnenin kütlesi ne kadar artarsa, hızını artırmak da o kadar zor olur. Bisikletin üzerindeki bir çocuğu itmek başka bir şeydir, bir kamyoneti itmek başka bir şey. Dolayısıyla bir müonun hızı artarken, hızını daha da artırmak giderek zorlaşır. Işık hızının yüzde 99,999'u hızda bir müonun kütlesi 224 kat artar; ışık hızının yüzde 99,99999999'u hızda bir müonun kütlesiyse 70.000 kattan daha fazla artar. Hızı ışık hızına yaklaştıkça müonun kütlesi sınırsız olarak artacağından, ışık hızına ulaşması ya da bu sınırı aşması için müonu *sonsuz* miktarda enerjiyle itmek gerekecektir. Bu da tabi ki imkânsızdır, dolayısıyla da hiçbir şey ışık hızından daha hızlı yol alamaz.

Sonraki bölümde göreceğimiz üzere, vardığımız bu sonuç, fizikçilerin geçen yüzyılda karşılaştıkları ikinci büyük çatışmanın tohumlarını attı ve sonuç olarak da saygı duyulup el üstünde tutulan başka bir kuramın, Newton'un evrensel kütleçekimi kuramının sonunu hazırladı.

III. Bölüm

Kıvrımlar ve Dalgalar Üzerine

Einstein özel görelilik kuramı sayesinde, hareket hakkındaki "asırlık sezgiler" ile ışık hızının sabitliği arasındaki çatışmayı çözmüştü. Çözüm, sezgilerimizin yanlış olduğuydu; sezgilerimiz ışık hızına kıyasla son derece yavaş olan hareketlere dayanıyordu, bu tür yavaş hızlarda da uzay ve zamanın gerçek karakteri gözlerden gizleniyordu. Özel görelilik, uzay ve zamanın doğasını gözler önüne serer, önceki kavrayışlarda görüldüklerinden kökten bir biçimde farklı olduklarını ortaya koyar. Gerçi uzay ve zamanın temellerine dair kavrayışımızı düzeltmek hiç de küçük bir iş değildir. Einstein çok geçmeden, özel göreliliğin ortaya koyduklarını izleyen çok sayıda çıkarım arasında özellikle birinin açıklanmasının güç olduğunu fark etmişti: Hiçbir şeyin ışıktan hızlı olamayacağı hükmünün, Newton'un 17. yüzyılın ikinci yarısında ortaya attığı, saygınlık kazanmış evrensel kütleçekimi kuramına uymadığı görülüyordu. Böylece özel görelilik, bir çatışmayı *gözerken* bir diğerine yol açmıştı. On yıl süren yoğun, kimi zaman da eziyetli çalışmalar sonucu Einstein bu ikilemi, genel görelilik kuramıyla çözdü. Einstein bu kuramıyla, uzay ve zamanın, kütleçekimi kuvvetini iletmek için yamulduğunu ve çarpıldığını göstererek uzay ve zamana dair anlayışımızda yine bir devrim yaratmıştı.

Newton'un Kütle çekimi Görüşü

1642'de İngiltere de Lincolnshire'da doğan Isaac Newton, matematiği tüm gücüyle fiziksel araştırmanın hizmetine sunarak bilimsel araştırmaların çehresini değiştirmişti. Newton öyle muazzam bir dehaydı ki, araştırmalarından bazıları için gereken matematiğin mevcut olmadığını gördüğünde o matematiği icat ediyordu. Dünya onunla kıyaslanabilecek bir bilimsel dehaya daha ev sahipliği yapana dek yaklaşık üç yüzyıl geçmesi gerekecekti. Newton'un evrenin

işleyişi hakkında vardığı çok sayıda bulgu arasında, burada bizi asıl ilgilendiren evrensel kütleçekimi kuramıdır.

Kütle çekimi kuvveti hayatın her alanına yayılmıştır. Bizi ve etrafımızdaki bütün cisimleri yerkürenin yüzeyinde tutar; soluduğumuz havanın d ış uzaya kaçmasını engeller; Ay'ı Dünyanın çevresinde, Dünyayı da Güneş'in çevresinde yörüngede tutar. Asteroitlerden gezegenlere, gezegenlerden yıldızlara, yıldızlardan galaksilere milyarlarca kozmik sakinin yorulmak dinlenmek nedir bilmeden gerçekleştirdiği kozmik dansın ritmini kütleçekimi belirler. Newton'un, üç yüzyıl boyunca süren etkisi, Dünya'daki ve Dünyanın dışındaki bu olayları tek bir kuvvete, kütleçekimine bağlı olarak görmemize yol açtı. Newton'dan önce, ağaçtan yere düşen bir elmanın, gezegenlerin Güneş'in etrafında dönmesini sağlayan aynı fiziksel ilkeye tabi olduğu yönünde bir anlayış yoktu. Newton bilimsel egemenlik hizmetinde cüretkâr bir adım atarak, gökleri ve yeryüzünü yöneten fiziği birleştirdi ve kütleçekimi kuvvetinin her alanda iş başında olan görünmez el olduğunu ilan etti.

Newton'un kütleçekimi görüşüne, büyük eşitleyici denebilir. Newton mutlaka her şeyin, kesinlikle geri kalan her şey üzerine çekici bir kütleçekimi kuvveti uyguladığını ilan etmişti. *Herşey* -fiziksel bileşimine bağlı olmaksızın- kütleçekimi kuvveti uygular ve bu kuvvete maruz kalır. Johannes Kepler'in gezegenlerin hareketleriyle ilgili çalışmasını iyice inceleyen Newton, iki cisim arasındaki kütleçekimine bağlı çekim gücünün, *tam olarak* iki şeye bağlı olduğu çıkarımında bulunmuştu: Cisimlerin her birini oluşturan malzeme miktarı ve cisimler arasındaki uzaklık. "Malzeme" madde demektir; bu protonların, nötronların ve elektronların toplam sayısı anlamına gelir ki, bu da cismin *kütlesini* belirler. Newton'un evrensel kütleçekimi kuramı, iki cisim arasındaki çekimin gücünün, kütlesi büyük cisimler arasında büyük, kütlesi küçük cisimler arasında küçük olacağını söyler; ayrıca cisimler arasındaki mesafe az olduğunda çekimin gücünün artacağını, mesafe büyüdüğünde de azalacağını söyler.

Newton bu niteliksel betimlemeden çok daha ileriye gidip iki cisim arasındaki kütleçekimi kuvvetinin gücünü niceliksel olarak betimleyen denklemler kaleme almıştı. Kelimeye döküldüklerinde bu denklemler, iki cisim arasındaki kütleçekimi kuvvetinin, kütlelerinin çarpımıyla doğru orantılı, aralarındaki mesafenin karesiyle ters orantılı olduğunu söyler. Bu "kütleçekimi yasası", gezegenlerin ve kuyrukluyıldızların Güneş etrafındaki, Ay'ın Dünya etrafındaki hareketlerini veya gezegenleri araştırmaya giden roketlerin hareketlerini tahmin etmekte kullanılabileceği gibi, havada uçan beysbol toplarının ya da tramplenden havada helezonlar çizerek havuza atlayan yüzücülerin hareketleri gibi, daha dünyevi durumlarda da kullanılabilir. Bu cisimlerin gözlenen hareketleri ile tahminler arasındaki uyum, dikkat çekicidir. Bu başarı Newton'un kuramının, 20. yüzyılın başlarına dek hiç kuşkulanılmaksızın desteklenmesine yol açtı. Fakat

Einstein'ın özel göreliliği keşfetmesi, Newton'un kuramının karşısına, aşılamaz olduğu anlaşılan bir engel çıkaracaktı.

Newton'un Kütle çekimi ile Özel Görelilik Arasındaki Uyuşmazlık

Özel görelilik kuramının ana unsurlarından biri, ışığın koyduğu mutlak hız engelidir. Bu sınırın sadece maddi cisimler için değil, sinyaller ve her türlü etki için geçerli olduğunun ayrımında olmak önemlidir. Bir yerden diğerine, ışık hızından daha hızlı şekilde bilgi ya da başka bir etki iletmenin bir yolu yoktur. Tabi ki, Dünya ışık hızından *dahayavaş* bir biçimde etki aktarmanın çeşitli yollarıyla doludur. Örneğin konuşmalarınız ve başka bütün sesler, havada saatte 1100 kilometrelik bir hızlayol alan titreşimlerle taşınır; ışık hızının saatte 1 milyar kilometre olduğu düşünülürse, pek düşük bir hızdır bu. Bu hız farkı, örneğin bir beysbol maçını tribünlerde seyrederken vurucudan uzaktaysanız belirginlik kazanır. Oyuncu topa vurduğunda, vurma sesi, topa vurulduğunu görmenizden bir süre *sonra* size ulaşır. Gök gürültülü fırtınalar sırasında da benzer bir şey yaşanır. Şimşek ve gök gürültüsü aynı anda ortaya çıkıyor olsa da, önce şimşeği görüp ardından gök gürültüsünü duyarsınız. Bu

dayine ışık ile ses arasındaki ciddi hız farkının sonucudur. Özel görelilik bize, tam tersi bir durumun, yani bir sinyalin bize çıkardığı ışıktan *önce* ulaşmasının imkânsız olduğunu söylemektedir. Hiçbir şey fotonları geçemez.

İşte pürüz de buradadır. Newton'un kütleçekimi kuramına göre, bir cisim bir başka cisim üzerinde, yalnızca söz konusu cisimlerin kütleleri ve birbirlerine olan mesafelerine bağlı bir güçle kütleçekimi kuvveti uygular. Bu gücün cisimlerin ne kadar süredir birbirlerini etkiledikleriyle hiçbir ilgisi yoktur. Bu da, kütlel eri ya da aralarındaki mesafe değişecek olursa, Newton'a göre cisimlerin karşılıklı kütle çekimlerinde *anında* bir değişiklik hissedeceği anlamına gelir. Örneğin Newton'un kütleçekimi kuramı, Güneş birden patlayacak olursa, Dünyanın (Güneş'ten 150 milyon kilometre uzaktadır) normal eliptik yörüngesinden hemen çıkacağı iddiasında bulunur. Patlamanın ışığının Güneş'ten Dünyaya ulaşması sekiz dakika alacak olsa da, Newton'un kuramına göre, Güneş'in patladığı bilgisi, yeryüzüne, hareketini yöneten kütleçekimi kuvvetindeki ani değişiklikle anında aktarılacaktır.

Bu sonuç özel görelilikle doğrudan çatışır; çünkü özel görelilik hiçbir bilginin ışık hızından daha hızlı aktarılamayacağını söyler; anında aktarımsa bu kuralı en üst düzeyde çiğner.

Dolayısıyla Einstein, 20. yüzyılın ilk yarısında, Newton'un muazzam derecede başarılı kütleçekimi kuramının kendisinin özel görelilik kuramıyla çatıştığını fark etti. Özel göreliliğin doğruluğundan emin olan, Newton'un kuramını destekleyen deneyler yığınını bir kenara bırakan Einstein, özel göreliliğe uygun düşecek yeni bir kütleçekimi kuramı arayışına girdi. Bu da onu, uzay ve zamanın özelliklerinin bir kez daha dikkat çekici bir dönüşüm geçirdiği genel görelilik kuramının keşfine götürdü.

Einstein'ın En İsabetli Fikri

Daha özel görelilik keşfedilmemişken dahi, Newton'un kütleçekimi kuramı, önemli biryönden eksikti. Kuram, cisimlerin kütleçekiminin

etkisiyle nasıl hareket edeceğine dair son derece doğru tahminlerde bulunmak için kullanılabiliyor olsa da, kütleçekiminin ne *olduğuna* dair bir fikir vermiyordu. Yani, fiziksel olarak birbirinden ayrı olan, aralarında belki de yüz milyonlarca kilometre mesafe olan cisimlerin birbirlerinin hareketlerini nasıl etkilediğine dair bir şey söylemiyordu. Kütle çekimi görevini hangi yolla gerçekleştiriyordu? Bu Newton'un da farkında olduğu bir sorundu. Şöyle demişti:

Cansız, cismani bir maddenin, başka bir şeyin aracılığı olmaksızın, maddi olmayan bir şeyin aracılığıyla karşılıklı temasa dayanmadan başka bir madde üzerinde işleyip onu etkilemesi düşünülemez. Kütle çekiminin maddede en baştan, ona içkin, onun esasını oluşturacak şekilde var olması, böylece bir cismin, başka bir şeyin aracılığı olmaksızın, uzaktaki başka bir madde üzerinde eylemleri ve kuvvetlerini birbirlerine aktarmalarını sağlayacak bir boşluk dola-yımıyla etkili olması, bana öyle büyük bir saçmalık gibi görünüyor ki, felsefi meselelerde yetkin bir düşünme becerisine sahip birinin bu saçmalığa inanma gafletine düşmeyeceğini düşünüyorum. Kütle çekimi, sürekli belli yasalara göre hareket eden bir aracı etkisiyle ortaya çıkıyor olmalıdır, fakat bu aracı maddi midir değil midir bunu okurlarımın değerlendirmesine bırakıyorum.

Demek oluyor ki Newton, kütleçekiminin varlığını kabul etmiş, etkilerini doğru bir biçimde tanımlayacak denklemler geliştirmeye girişmişti, fakat hiçbir zaman kütleçekiminin nasıl işlediğine dair bir fikir ileri sürmemişti. Dünyaya, kütleçekimiyle ilgili onu nasıl "kullanacağımızı" anlatan bir "kullanım kılavuzu" bırakmıştı; fizikçiler, gökbilimciler ve mühendisler, Ay'a, Mars'a, Güneş sistemindeki başka gezegenlere gönderilen roketlerin izleyeceği rotayı çizmek, Güneş ve Ay tutulmalarını tahmin etmek, kuyrukluyıldızların hareketlerine dair tahminlerde bulunmak ve benzeri birçok şey için bu kılavuzdan başarıyla yararlanacaklardı. Fakat Newton kütleçekiminin iç işleyişi -kütleçekiminin "kara kutusu"nun içeriği- sırrını koruyordu. Bilgisayarınızı veya CD çalarınızı kullanırken, iç işleyişleri hakkında benzer bir cehalet içinde olduğunuzu fark edebilirsiniz. Cihazı nasıl kullanacağınızı biliyorsanız, ne sizin ne de başka birinin, cihazın yapmasını istediğiniz işi nasıl gerçekleştirdiğini

bilmesi gerekmez. Ama CD çalarınız ya da bilgisayarınız bozulduğunda, onarımı iç işleyişle ilgili bilgiye dayanır. Keza Einstein da özel göreliliğin, Newton'un kuramının yüzlerce yıldır deneysel olarak doğrulanıyor olsa da kolayca fark edilmeyecek şekilde ' 'bozulduğunu" gösterdiğini, kuramın onarımının kütleçekiminin gerçek niteliğinin tam anlamıyla ne olduğu sorusuyla yüzleşmeyi gerektirdiğini anlamıştı.

Einstein 1907'de, İsviçre'nin Bern kentinde patent bürosundaki masasında bu meselelere kafa patlatırken, nihayetinde onu yepyeni bir kütleçekimi kuramına götürecek temel bir kavrayışa sahipti. Newton'un kuramından boşalan yeri doldurmakla kalmayacak, kütleçekimini ele alışı tümüyle yeniden formüle edecek, en önemlisi de bunu özel görelilikle tamamen tutarlı bir biçimde gerçekleştirecek bir yaklaşımı benimsemişti.

Einstein'ın kavrayışı II. Bölüm'de sizi rahatsız etmiş olabilecek bir sorunla ilgiliydi. II. Bölüm'de, Dünyanın sabit hız ve doğrultudaki göreli hareket halindeki bireylere nasıl göründüğünü anlamakla ilgilendiğimizi vurgulamıştık. Bu bireylerin gözlemlerini titizlikle karşılaştırarak uzay ve zamanın doğasına dair bazı ciddi sonuçlara varmıştık. Peki ya *ivmeli* hareket halinde olan bireyler açısından durum nasıldır? Bu bireylerin gözlemlerinin analizi, sabit hız ve doğrultuda hareket edenlerin yani daha sakin bir seyir halinde olanların gözlemlerinin analizinden daha karmaşık olacaktır, yine de bu karmaşıklığı çözmenin ve ivmeli hareketi uzay ve zamanla ilgili yeni anlayışımıza katabilmenin bir yolu olup olmadığını sorabiliriz.

Einstein'ın "en isabetli düşüncesi" bunu nasıl yapabileceğimizi gösteriyordu. Onun kavrayışını anlayabilmek için, 2050 yılında olduğumuzu düşünelim; FBI'ın baş patlayıcı uzmanısınız, Washington D.C.'nin göbeğine yerleştirilmiş, yüksek teknoloji ürünüymüş gibi görünen bir bombayı incelemenizi isteyen bir telefon aldınız az evvel. Olay yerine koşup aygıtı incelediğinizde, en korktuğunuz şeyin başınıza geldiğini görüyorsunuz: Bomba nükleer bir bomba, üstelik de o kadar güçlü ki, yerkabuğunun ya da bir okyanusun dibine gömülse dahi, patlaması yıkıcı bir etki yaratacak.

Bombanın imha mekanizmasını ihtiyatla inceledikten sonra, aygıtı etkisiz hale getirmenin mümkün olmadığını anlıyorsunuz, dahası alışılmışın dışında bir bubi tuzağı kurulu olduğunu görüyorsunuz. Bomba bir tartının üzerine yerleştirilmiş, göstergede halihazırda görülen değerin yarısından fazla bir sapma olduğunda bomba patlayacak. Zamanlama mekanizmasına göre sadece ve sadece bir haftanız var, geri sayım da başlamış durumda. Milyonlarca insanın kaderi size bağlı; ne yapardınız?

Eh, Dünya'nın üzerinde ya da içinde aygıtı etkisiz hale getirebileceğiniz güvenli bir yer olmadığına kani olduğunuza göre, tek bir seçeneğiniz varmış gibi görünüyor: Aygıtı dış uzayda uzaklara, patlamasının hiçbir hasara sebep olmayacağı bir yere göndermelisiniz. FBEdaki ekibinizle yaptığınız toplantıda bu fikri gündeme getiriyorsunuz, getirir getirmez de genç bir asistan planınıza karşı çıkıyor. Asistanınız Isaac, "Planınızda ciddi bir sorun var," diyor. "Aygıt Dünya'dan uzaklaştıkça, yerçekimi azalacağından aygıtın ağırlığı da azalacak. Bu da aygıtın üzerindeki göstergedeki değerin düşeceği ve bombanın uzayın derinliklerinde enıniyetli bir yere ulaşmadan çok önce patlayacağı anlamına geliyor." Siz daha bu eleştiriyi doğru dürüst tartışmadan, başka bir genç asistan araya giriyor. "Şimdi düşündüm de, başka bir sorun daha var," diyor asistanınız Albert. "Bu da en az Isaac'in itirazı kadar önemli bir sorun, ama daha zor anlaşılacak bir şey, o yüzden açıklamama izin verin lütfen." Isaac'in itirazı üzerine düşünmek istediğinizden Albert'i susturmaya çalışıyorsunuz. Ama her zamanki gibi, Albert bir başladı mı durdurmanın imkânı yok.

"Aygıtı dış uzaya göndermek için bir rokete yerleştirmeniz gerekiyor. Roket dış uzaya çıkmak için yukarıya doğru *ivme kazanacağından* göstergedeki değer *yükselecektir,* bu da yine aygıtın erken patlamasına yol açacaktır. Bakın, bombanın tabanı tartının üzerinde, dolayısıyla tartıya, aygıt hareketsizken yaptığından daha fazla baskı yapacak; tıpkı hızlanan bir otomobilde gövdenizin koltuğa yapışmasında olduğu gibi. Otomobilin koltuğunda sırtınız nasıl arkanızdaki yastığı sıkıştırıyorsa, bomba da göstergeyi

"sıkıştıracak". Bu durumda da tartının gösterdiği değer artacak tabü, artış yüzde 50'den fazla olursa da bomba patlayacak."

Albert'e yorumu için teşekkür ediyorsunuz, ama Isaac'in sözlerini zihninizde doğrulamaya çalışırken onun açıklamasını pek dinlemediğinizden, bir fikri öldürmeye bir tek ölümcül darbenin yeteceğini, Isaac'in gayet doğru gözleminin de bunu kesinlikle başardığını söylüyorsunuz bıkkın bıkkın. Biraz umutsuzca yeni tavsiyeler beklediğinizi söylüyorsunuz. O sırada Albert şaşırtıcı bir açıklama yapıyor: "Fakat bir kere daha düşünecek olursak," diye devam ediyor, "Fikrinizin tümüyle öldüğünü sanmıyorum. Isaac'in, aygıt uzaya çıkarken kütleçekiminin azalacağı yönündeki gözlemi, göstergedeki değerin *düşeceği* anlamına geliyor. Benim gözlemim, yani roketin yukarıya doğru hızlanmasının aygıtın tartıya daha fazla baskı yapmasına yol açacak olmasıysa, göstergedeki değerin *yükseleceği* anlamına geliyor, ikisini birlikte ele alırsak, demek oluyor ki, yukarıya doğru hareket ederken roketin ivmesini an be an titizlikle değiştirirsek, bu iki etki *birbirini ortadan kaldırabilir!* Özellikle de kalkışın ilk aşamalarında, roket yeryüzünün kütleçekiminin tüm kuvvetini hâlâ hissederken, çok keskin olmayan bir şekilde ivme kazanabilir, böylece yarı yarıya aralığında kalabiliriz. Roket Dünya'dan uzaklaştıkça -dolayısıyla yeryüzünün kütleçekimini giderek daha az hissederken- yukarıya doğru ivmelenmesini bunu telafi edecek şekilde artırmamız gerekiyor. Göstergedeki değerde, yukarıya doğru ivmelenmeden kaynaklanan artış, kütleçekiminin azalmasından kaynaklanan düşüşe tamamen eşit olabilir, böylece aslında tartının göstergesindeki değeri, değişmesine hiç yol açmaksızın koruyabiliriz!"

Albert'in önerisi yavaş yavaş bir anlam ifade etmeye başlıyor. "Başka bir deyişle, yukarıya doğru ivmelenme, kütleçekiminin yerine geçebilir, yani onun muadili olabilir. Uygun biçimde ivmelendirilmiş hareketle, kütleçekiminin etkisini taklit edebiliriz," diye karşılık veriyorsunuz.

"Aynen öyle," diyor Albert.

"Yani, bombayı uzaya fırlatabiliriz, roketin ivmelenmesini de akıllıca değiştirerek göstergedeki değerin değişmemesini sağlayabilir. böylece bomba Dünya'dan güvenli bir uzaklığa gidinceye kadar ana patlamadan kaçınmış oluruz," diye devam ediyorsunuz. Böylece kütleçekimini ve ivmeli hareketi -21. yüzyıl roket biliminin inceliklerini- kullanarak felaketi önleyebileceksiniz.

Kütle çekimi ile ivmeli hareketin temelden iç içe geçmiş olduğunu fark etmek, güzel bir günde Bern'deki patent ofisinde Einstein'ın aklına gelen kilit görüştü. Bomba örneği Einstein'ın fikrinin özünü vurgulasa da, bu fikri II. Bölüm'de kullandığımı-zayakın bir çerçevede yeniden dile getirmeye değer. Hatırlayın, her tarafı kapalı, penceresiz, *ivmelenmeyen* bir kompartımanda, hızınızı belirleyebilmeniz mümkün değildir. Kompartıman aynı görünür, yaptığınız deneyler de ne kadar hızlı hareket ettiğinize bağlı olmaksızın aynı sonuçları verir. Daha da temel bir nokta var: Kıyaslama yapabilmenizi sağlayacak dış işaretler olmaksızın, hareketinize bir yönlü hız tayin etmek bile mümkün değildir. Öte yandan ivmeleniyorsanız, algılarınız her tarafı kapalı kompartımanınızla sınırlı olsa dahi, vücudunuzda bir kuvvet *hissedeceksinizdir.* Örneğin ileriye bakan koltuğunuz zemine sabitlenmişse, kompartımanınız da ileriye doğru ivme kazanıyorsa, koltuğunuzun kuvvetini sırtınızda hissedersiniz, tıpkı Albert'in verdiği otomobil örneğinde olduğu gibi. Keza kompartımanınız yukarıya doğru ivme kazanırsa, ayaklarınızın altında zeminin kuvvetini hissedersiniz. Einstein şunu fark etmişti: Küçük kompartımanınızın sınırları içinde, bu ivmelenmiş durumları, *ivmesiz* fakat *kütleçekimli* durumlardan ayırt etmeniz mümkün olmayacaktır: Büyüklükleri akıllıca değiştirildiğinde, bir kütleçekimi alanında hissettiğiniz kuvvet ile ivmeli hareketten gelen kuvveti birbirinden ayırmanız mümkün değildir. Kompartımanınız sessiz sakin yeryüzünde duruyor olsaydı, zeminin o tanıdık kuvvetini ayaklarınızın altında hissedecektiniz, tıpkı yukarı doğru ivmelenme senaryosunda olduğu gibi; Albert'in teröristlerin bombasını uzaya göndermeye yönelik çözümünde kullandığı eşdeğerlik tam da budur. Kompartımanınız arka ucuna dayalı olarak duruyor olsaydı, koltuğunuzun kuvvetini (düşmenizi engelleyen o kuvveti) sırtınızda hisserderdiniz, tıpkı yatay olarak ivme

kazanmanızda olduğu gibi. Einstein ivmeli hareket ile kütleçekiminin birbirinden ayırt edilememesine *eşdeğerlik ilkesi* demişti.

Bu betimleme, özel göreliliğin başladığı bir işi genel göreliliğin bitirdiğini gösteriyor. Özel görelilik kuramı görelilik ilkesi sayesinde gözlem yapılan duruş noktalarının serbestliğini ilan eder: Fizik yasaları sabit hız ve doğrultuda hareket eden bütün gözlemciler için aynıdır. Fakat bu gerçekte sınırlı bir serbestliktir, çünkü çok sayıda başka bakış açısını, hareketleri ivmelenen bireylerin bakış açılarını dışlar. Einstein'ın 1907'deki görüşü, bugün artık bize bütün bakış açılarını -sabit hız ve doğrultuda hareket ile ivmeli hareket- eşitlikçi tek bir çerçevede nasıl kucaklayacağımızı gösteriyor. Bir kütleçekimi alanı olmayan ivmeli bir duruş noktası ile bir kütleçekimi alanı olan ivmesiz bir duruş noktası arasında hiçbir fark olmadığından, ikinci bakış açısını kullanarak şunu söyleyebiliriz: *Bütün gözlemciler, kendi çevrelerinin betimlemesine uygun bir kütleçekimi alanı dahil ettikleri sürece, hareket durumlarından bağımsız olarak, durağan olduklarını ve "dünyanın geri kalan kısmının yanlarından geçip gittiğini" söyleyebilir.* Bu anlamda kütleçekiminin işin içine dahil edilmesi sayesinde, genel görelilik bütün olası gözlem noktalarının aynı düzeyde olmasını sağlar. (Daha sonra da göreceğimiz gibi, bu İL Bölüm'de, gözlemciler arasında ivmeli harekete dayalı farkların da -George'un tepkili motorunu çalıştırıp Gracie'nin peşine düşmesi ve ondan daha genç kalmasında olduğu gibi- ivmesiz fakat kütle çekimli eşdeğer bir betimlemenin olabileceğinin kabul edildiği anlamına gelir.)

Kütle çekimi ile ivmeli hareket arasındaki bu derin bağlantıyı idrak etmek kuşkusuz dikkate değer, fakat Einstein için neden bu kadar önemlidir? Basitçe söyleyecek olursak sebebi, kütleçekiminin gizemli olmasıdır. Kütle çekimi kozmosun hayatına nüfuz etmiş büyük bir kuvvettir, fakat ele geçmez, ruh gibidir. Öte yandan ivmeli hareket, sabit hız ve doğrultudaki harekete göre biraz daha karmaşık olsa da, somuttur, elle tutulup gözle görülebilir niteliktedir. Einstein bu ikisi arasında temel bir bağ bulunca, hareketle ilgili kavrayışını, kütleçekimine ilişkin benzer bir kavrayışa varmak için de kullanabileceğini fark etmişti. Bu stratejiyi uygulamaya koymak,

Einstein gibi bir dahi için bile hiç de kolay bir iş olmamıştı; fakat bu yaklaşım nihayetinde meyvesini genel görelilikle vermişti. Fakat bu noktaya ulaşabilmesi, Einstein'ın kütleçekimi ile ivmeli hareketi birleştiren zincire ikinci bir halka daha eklemesini gerektirmişti: Birazdan göreceğimiz üzere uzay ve zamanın *eğrilmesi.*

İvme ve Uzay ile Zamanın Yamulması

Einstein, kütleçekimini anlamak için aşırıya varan, neredeyse takıntılı bir yoğunlukla çalışıyordu. Bern'deki patent bürosunda, o isabetli fikre ulaşmasından beşyıl sonra fizikçi Arnold Sommerfeld'e şu satırları yazmıştı: "Bugünlerde sadece kütleçekimi sorunu üzerinde çalışıyorum. (....) Şurası kesin ki, hayatımda hiçbir şey beni bu kadar yormamıştı. (.....) Bu problemle karşdaştırılınca orijinal (özel) görelilik kuramı çocuk oyuncağı gibi kalıyor."

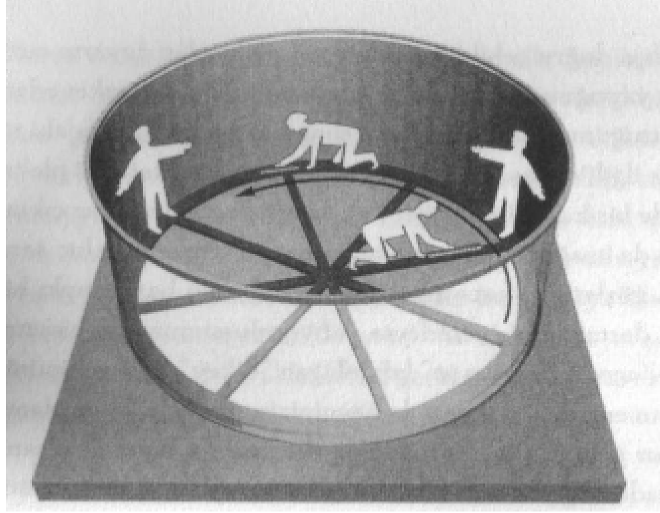
Öyle görünüyor ki bir sonraki kilit atılımı, özel göreliliği kütleçekimi ile ivmeli hareket arasındaki bağa uygulamanın getirdiği basit fakat kolayca anlaşılmayan sonuca ulaşması 1912'de gerçekleşecekti. Einstein'ın mantık yürütmesindeki bu adımı anlayabilmenin en kolay yolu, tıpkı onun yaptığı gibi, belli bir ivmeli hareket örneğine odaklanmaktan geçer. Bir cismin hızı ya da hareket doğrultusu değiştiğinde ivmelendiğini hatırlayalım. Basit olması için, cismimizin hızı sabit kalırken *sadece* hareket doğrultusunun değiştiği ivmeli harekete odaklanalım. Özellikle de, lunaparkta Tornadoya bindiğinizde yaşanana benzer, bir çember şeklindeki hareketi düşünelim. Tornadoya binip duruşunuzun sağlamlığını hiç sınamadıysanız şöyle anlatayım, sırtınızı yüksek hızda dönen dairesel pleksiglas yapının iç kısmına dayayarak durursunuz. Bütün ivmeli hareketlerde olduğu gibi, bu hareketi hissedersiniz; vücudunuzun merkezden dışa doğru çekildiğini, dairesel pleksiglas duvarın sırtınıza baskı yaptığını, sizi bir daire izleyecek şekilde hareket eder halde tuttuğunu hissedersiniz. (Aslına bakarsanız, buradaki tartışmayla ilgili olmasa da belirteyim, dönme hareketi sizi pleksiglasa öyle bir kuvvetle "çiviler" ki, üzerinde durduğunuz çıkıntı olmasa da aşağıya doğru kaymazsınız.) Hareketiniz hiç sarsıntısızsa, gözlerinizi kapattığınızda, sırtınızdaki baskı -tıpkı bir

yatağın desteği gibi- neredeyse yatıyormuşsunuz gibi hissetmenize yol açar. "Neredeyse" lafı, olağan "dikey" kütleçekimini hâlâ hissetmenizden, dolayısıyla beyninizin tümüyle kandırılamamasından gelir. Fakat Tornadoya dış uzayda binecek olsanız ve Tornado doğru hızda dönecek olsa, Dünya'da hareket etmeyen bir yatağa uzanmışsınız gibi hissederdiniz. Dahası, "ayağa kalkıp" dönen pleksiglasın iç yüzeyinde yürüyecek olsanız, ayaklarınız pleksiglasa yere basıyormuş gibi basardı. Aslına bakarsanız uzay istasyonları da bu şekilde dönüp dış uzayda suni bir kütleçekimi duygusu yaratacak şekilde tasarlanmışlardır.

Dönen Tornado'nun ivmeli hareketini kütleçekimini taklit etmek için kullandığımıza göre, artık Einstein'ı takip edip uzay ve zamanın bu alete binen birine nasıl göründüğünü incelemeye geçebiliriz. Einstein'ın akıl yürütmesi bu duruma uyarlandığında şu şekilde ilerliyordu: Biz, duran gözlemciler dönen Tornado'nun çevresini ve yarıçapını kolaylıkla ölçebiliriz, örneğin çevreyi ölçmek için, Tornado'nun dönen kısmının etrafını bir cetvelle, cetveli kaydıra kaydıra ölçeriz; yarıçapını ölçmek için de aynıyöntemi kullanarak Tornado'nun ortasından dış duvarına doğru ilerleriz. Lise geometrisinden hatırladığımız gibi, çevresiyle yarıçapının oranının, pi sayısının iki katına eşit olduğunu buluruz -yaklaşık 6,28- tıpkı bir kâğıt üzerine çizilen bütün dairelerde olduğu gibi. Peki ya Lornado'nun içindeki birine işler nasıl görünecektir?

Bunu öğrenebilmek için, Lornado'da dönüşün keyfini çıkaran Slim ile Jim'den bizim için birkaç ölçüm yapmalarını istiyoruz. Cetvellerimizden birini çevreyi ölçsün diye Slim'e, diğerini de yarıçapı ölçmesi için Jim'e veriyoruz. Durumu rahatça değerlendirebilmek için. Tornadoya Şekil 3.1'de görüldüğü üzere yukarıdan bakalım. Tornado'nun bu çizimini, hareket doğrultusunu gösteren bir okla süsledik. Slim çevreyi ölçmeye başladığında, onu yukarıdan izlerken, bizim bulduğumuzdan daha farklı bir sonuca ulaşacağını hemen anlıyoruz. Cetvelini Tornado'nun çevresini ölçmek için yere koyduğunda, cetvelin *boyunun kısaldığını* fark ediyoruz. II. Bölüm'de tartıştığımız, bir cismin hareket doğrultusundaki boyutunun kısalmış görünmesine yol açan Lorentz büzülmesinden başka bir şey değil

bu. Cetvelin daha kısa olması, Slim'in Tornado'nun çevresini ölçebilmek için, cetveli *daha fazla* kere yere koyması gerektiği anlamına geliyor. Slim cetvelinin hâlâ 30 santimetre uzunluğunda olduğunu düşündüğünden (Slim ile cetveli arasında göreli bir hareket olmadığından, cetvelini hâlâ normal uzunluğunda gibi algılıyor), bu durum, Slim'in ölçümüne göre, Tornado'nun çevresinin bizim ölçtüğümüzden daha *uzun* çıkacağı anlamına geliyor.



Şekil 3.1 Slim'in cetveli kısalmış, çünkü Tornadonun hareket doğrultusu boyunca uzanıyor. Ama Jim'in cetveli, çapı oluşturan kirişin üzerinde, Tornado'nun hareket doğrultusuna dik duruyor, dolayısıyla da uzunluğu değişmemiş.

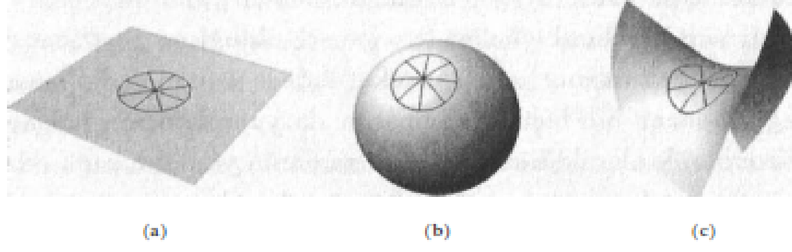
Peki ya Tornado'nun yarıçapı? Jim de merkezden çevreye doğru uzanan kirişi ölçerken aynı yöntemi kullanıyor, onu yukarıdan izlerken bizim bulduğumuz sonuca ulaşacağını görüyoruz. Bunun sebebi, cetveli Tornado'nun hareket doğrultusuna paralel kullanmasıdır (oysa çevrenin ölçümünde durum böyle değildi). Cetvel hareket doğrultusuyla 90 derecelik bir açı yapacak şekilde kullanılmaktadır, bu yüzden de boyu kısalmamıştır. Dolayısıyla Jim, bizim bulduğumuzla tıpatıp aynı bir yarıçap uzunluğuna ulaşacaktır.

Fakat Slim ile Jim, Tornado'nun çevresinin yarıçapına oranını hesapladıklarında bizim bulduğumuz cevaptan (pi sayısının iki katı) daha fazla bir sayı bulacaklar, çünkü çevreyi daha uzun, ama

yarıçapı aynı uzunlukta ölçtüler. İşte bu biraz tuhaf Nasıl olur da şu dünyada daire şeklinde bir şey. Eski Yunanlıların farkına vardığı bütün dairelerde bu oranın pi sayısının tam iki katı olacağı kuralını çiğner?

İşte Einstein'ın açıklaması: Eski Yunanlıların vardığı sonuç, düz bir yüzeye çizilmiş daireler için geçerlidir. Fakat nasıl bir lunaparktaki güldüren aynalar yansımanızın normal uzamsal ilişkilerini çarpıtıyorsa, yamulmuş ya da eğri bir yüzeye çizilen dairenin olağan uzamsal ilişkileri de çarpılır: Çevresinin yarıçapına oranı genellikle pi sayısının iki katı *olmaz.*

Örneğin Şekil 3.2'de yarıçapları birbirinin aynı olan üç daire kıyaslanmaktadır. Fakat dairelerin çevrelerinin aynı *olmadığına* dikkat edin. Bir kürenin eğri yüzeyine çizilmiş olan, b'deki dairenin çevresi, a'daki düz bir yüzeye çizilmiş dairenin çevresinden kısadır, ama ikisinin de yarıçapı aynı uzunluktadır. Kürenin yüzeyinin eğri yapısı, dairenin merkezinden geçen çizgilerin biraz birbirine yaklaşmasına, sonuçta da dairenin çevresinin biraz küçülmesine yol açar. Yine eğri bir yüzeye -eyer şeklindeki bir yüzeye- çizilmiş olan, c'deki dairenin çevresi ise düz biryüzeye çizilmiş olan dairenin çevresinden uzundur; eyerin yüzeyinin eğri yapısı, dairenin merkezinden geçen çizgilerin birbirinden biraz uzaklaşmasına, sonuçta da dairenin çevresinin biraz uzamasına yol açar. Bu gözlemler, b'deki dairenin çevresinin yarıçapına oranının pi sayısının iki katından az olacağı, aynı oranın c'de pi sayısının iki katından fazla olacağı anlamına gelir. Fakat pi sayısının iki katı oranından sapma, özellikle de c'de bulunan büyük değer, tam da dönen Tornado'da bulduğumuz sonuçtur. Bu da Einstein'ı "olağanın", başka bir deyişle Eukleidesçi geometrinin çiğnenmesini açıklamaya yönelik bir fikir ileri sürmeye götürdü: Uzayın eğrilmesi. Yunanlıların, binlerce yıldır okullarda çocuklara öğretilen geometrisi Tornado'da dönen biri için geçerli olmuyordu işte. Onun yerini Şekil 3.2 (c)'de şematik olarak çizilmiş kıvrımlı uzay genellemesi alıyordu."



Şekil 3.2 Dairelerin hepsinin yarıçapı aynı olsa da, bir kürenin üzerine çizilmiş bir dairenin (b) çevresi, bir kâğıda çizilmiş dairenin (a) çevresinden küçük olacaktır, bir eyerin yüzeyine çizilmiş bir dairenin (c) çevresi de hepsinden uzun olacaktır.

Böylece Einstein, Yunanlıların kanunlaştırmış olduğu, bildik geometrik uzamsal ilişkilerin, düz bir masa üzerindeki bir daire gibi "düz" uzam şekilleri için geçerli olan ilişkilerin, ivmeli bir gözlemcinin bakış açısı söz konusu olduğunda geçerli olmadığını fark etmişti. Burada ivmeli hareketin yalnızca bir biçimini inceledik, ama Einstein aynı sonucun -uzayın yamulmasının- bütün ivmeli hareket biçimleri için geçerli olduğunu göstermişti.

Aslına bakarsanız ivmeli hareket sadece uzayın yamulmasına değil, benzer bir biçimde zamanın da yamulmasına yol açar. (Kronolojik olarak Einstein önce zamanın yamulmasına odaklanmış, uzayın yamulmasının önemini bundan sonra ayrımsamıştı.) Bir bakıma, zamanın da etkileniyor olması çok da şaşırtıcı gelmemeli, özel göreliliğin uzay ile zaman arasında bir birlikteliği ifade ettiğini II. Bölüm'de görmüştük. Bu birleşme, 1908'de özel görelilik ile ilgili bir konferansta, Minkowski'nin şairane sözleriyle şöyle özetlenmişti: "Bundan böyle kendi başına uzay, kendi başına zaman, gölgeler arasında kaybolup gidecek, sadece ikisinin bir birliği bağımsızlığını koruyacak."' Özel görelilik kuramı da daha gerçekçi, fakat aynı ölçüde muğlak bir dille, uzay ile zamanı uzay-zamanın birleşik yapısı içinde bir araya getirerek "Uzay için geçerli olan zaman için de geçerlidir," der. Fakat bu bir soru doğuruyor: Yamulmuş uzayı, eğri bir şekilde resmedebiliyoruz, peki ya yamulmuş zaman derken aslında neyi kast ediyoruz?

Cevabı biraz kestirebilmek için Slim ile Jim'i yine Tornadoya bindirelim ve onlardan aşağıdaki deneyi gerçekleştirmelerini isteyelim. Slim, Tornado'nun ortasından geçen kirişlerden birinin ucunda, sırtını pleksiglasın iç yüzüne vererek duracak, Jim de merkezden başlayarak kiriş boyunca yavaş yavaş ona doğru emekleyecek. Birkaç adımda bir Jim duracak ve iki kardeş saatlerini karşılaştıracaklar. Ne görecekler? Yukarıdan, sabit yerimizden onları izlerken cevabı tahmin edebiliriz yine: Saatleri tutmayacak. Bu sonuca varıyoruz, çünkü Slim ile Jim'in farklı hızlarda yol aldığının farkındayız; Tornado'da bir kiriş üzerinde merkezden uzaklaştıkça, bir dönüşü tamamlamak için daha çok yol alırsınız, dolayısıyla da daha hızlı gidersiniz. Fakat özel göreliliğe göre, ne kadar hızlı giderseniz saatiniz o kadar yavaş ilerler, buradan da Slim'in saatinin Jim'in saatinden daha yavaş işleyeceğini anlıyoruz. Dahası Slim ile Jim, Jim Slim'e yaklaştıkça Jim'in saatinin yavaşladığını, Slim'in saatinin hızına yaklaştığını da görecek. Bu da, Jim'in kiriş üzerinde merkezden uzağa gittikçe, dairesel hızının artıp Slim'inkine yaklaşacağını yansıtıyor.

Slim ile Jim gibi, Tornado'daki gözlemciler açısından, zamanın akış hızının, tam olarak durdukları yere -bu durumda Tornado'nun merkezinden uzaklıklarına- bağlı olduğu sonucuna varıyoruz. İşte bu, yamulmuş zamanla ne kast ettiğimizi gösterir: Akış hızı bir yerden diğerine farklılık gösteriyorsa, zaman yamulmuştur. Buradaki tartışmamız açısından özellikle önemli bir nokta daha var, Jim kiriş üzerinde emeklerken bir şeyi daha fark edecektir. Dışa doğru giderek daha güçlü bir biçimde çekildiğini hissedecektir, çünkü Tornado'nun merkezinden uzaklaştıkça yalnızca hızı artmakla kalmamış, ivmesi de artmıştır. O halde Tornado'da, ivmenin artmasının saatlerin yavaşlamasıyla bağlantılı olduğunu, yani ivme arttıkça bunun zamanda daha önemli bir yamulmaya yol açtığını görüyoruz.

Bu gözlemler Einstein'ı nihai adıma götürdü. Kütle çekimi ile ivmeli hareketin gerçekte birbirinden ayırt edilemez olduğunu daha önce göstermişti, şimdi de ivmeli hareketin uzay ve zamanın yamulmasıyla ilgili olduğunu gösteriyordu; böylece kütleçekiminin "kara kutusunun" içindekilere, yani kütleçekiminin işleyiş

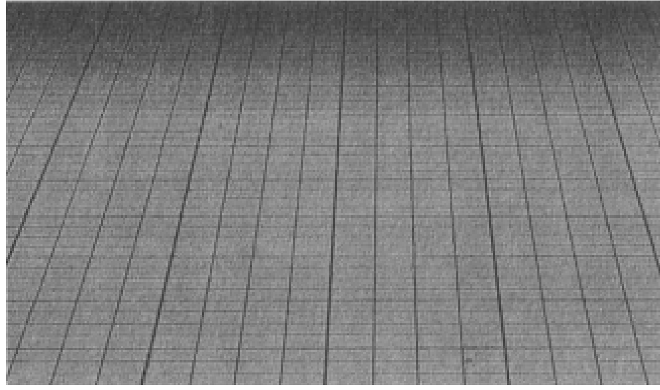
mekanizmasına ilişkin şu önermeyi ortaya attı: Kütle çekimi (Einstein'a göre) uzay ile zamanın *yamulmasıdır.* Gelin bunun ne anlama geldiğini görelim.

Genel Göreliliğin Esasları

Bu yeni kütleçekimi görüşüne dair bir kavrayış edinebilmek için, Güneş gibi biryıldızın etrafında dönen Dünya gibi bir gezegenin örnek durumunu düşünelim. Newtoncu kütleçekimine göre, Güneş Dünyayı yörüngede tanımlanamayan kütle çekimsel bir "ip"le tutar, bu ip nasılsa anında uzayda engin mesafeleri aşıp Dünyayı yakalayıverir (keza Dünya da uzanıp Güneş'i yakalar). Einstein gerçekte neler olup bittiğine dair yeni bir kavrayış ortaya attı. Einstein'ın yaklaşımıyla ilgili tartışmamızda, uzay-zamana dair rahat bir şekilde kullanabileceğimiz somut bir görsel modelimizin olması bize yardımcı olacaktır. Bunu yapabilmek için de işleri iki biçimde sadeleştireceğiz. Öncelikle, şimdilik zamanı bir kenara bırakıp yalnızca görsel bir uzay modeline odaklanacağız. Sonra zamanı, bu tartışmaya dahil edeceğiz, İkincisi, bu kitabın sayfalarında görsel imgeleri çizmemiz ve üstlerinde çalışmamız mümkün olabilsin diye de genellikle üçboyutlu uzayın *ikiboyudu* bir benzerine atıfta bulunacağız. Bu daha az sayıda boyutlu modelle düşünmemizin bize kazandırdığı kavrayış üçboyutlu fiziksel ortama doğrudan uyarlanabilir, dolayısıyla bu daha basit model güçlü bir eğitici aygıt olacaktır.

Şekil 3.3'te bu sadeleştirmelerden yararlanıyoruz ve evrenimizin uzamsal bölgesinin ikiboyutlu bir modelini çiziyoruz. Izgarayı andıran yapı, tıpkı sokakların bir kentteki konumları belirlememizi sağlamasında olduğu gibi, konumlan belirlemenin uygun bir yolu. Tabi ki bir kentte, adres verecek olduğumuzda, bir yeri hem sokakların ikiboyutlu kesişmelerine dayanarak anlatırız, hem de dikey doğrultuda bir yer belirtiriz, kaçıncı katta olduğunu söyleriz örneğin. Görsel açıklığı sağlamak amacıyla ikiboyutlu çizimimizde, bu son bilgiyi, üçüncü uzamsal boyuttaki yer bilgisini atlayacağız.

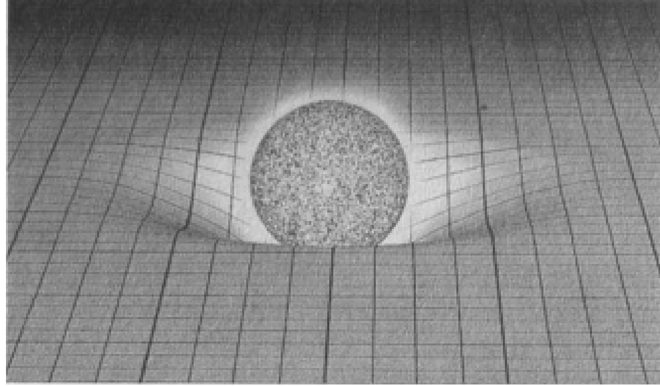
Einstein madde, yani enerji olmazsa, uzayın düz olacağını tasavvur etmişti. İkiboyutlu modelimizde bu, uzayın "şeklinin" Şekil 3.3'te çizildiği üzere, düz bir masanın yüzeyi gibi olması gerektiği anlamına gelir. Uzamsal evrenimizin, binlerce yıldır yaygın kabul gören görüntüsü budur. Peki Güneş gibi, büyük kütleli bir cisim var olursa, uzaya ne olur? Einstein'dan önce bu sorunun cevabı "hiçbir şey" idi; uzayın (ve zamanın) hareketsiz bir tiyatro sahnesi olduğu düşünülüyordu, evrendeki olayların vuku bulduğu bir dekordan ibaret olduğu sanılıyordu. Fakat, Einstein'ın takip etmekte olduğumuz mantık zinciri, farklı bir sonuca varır.



Şekil 3.3 Düz uzayın şematik bir temsili

Güneş gibi büyük kütleli bir cisim, hatta herhangi bir cisim, başka cisimler üzerine bir kütleçekimi kuvveti uygular. Bomba örneğinde, kütleçekimi kuvvetinin ivmeli hareketten ayırt edilemeyeceğini öğrenmiştik. Tornado örneğinde de, ivmeli hareketin matematiksel olarak betimlenmesinin eğri uzay ilişkileri *gerektirdiğini* görmüştük. Kütle çekimi, ivmeli hareket ve eğri uzay arasındaki bu bağlantılar, Einstein'ı dikkat çekici bir iddiada bulunmaya götürdü: Güneş gibi bir kütlenin var olması, o kütlenin etrafındaki uzay dokusunun Şekil 3.4'te görüldüğü gibi yamulmasına yol açacaktı. Yararlı, sık sık kullanılan bir benzetme de şudur; üzerine bir bovling topu konmuş plastik bir branda gibi, uzayın dokusu da Güneş gibi büyük bir cismin varlığı sebebiyle bozulur. Bu radikal önermeye göre, uzay evrendeki olayların sahnesi olan edilgin bir platform değildir; aksine uzayın şekli, ortamdaki cisimlere *karşılık verir.*

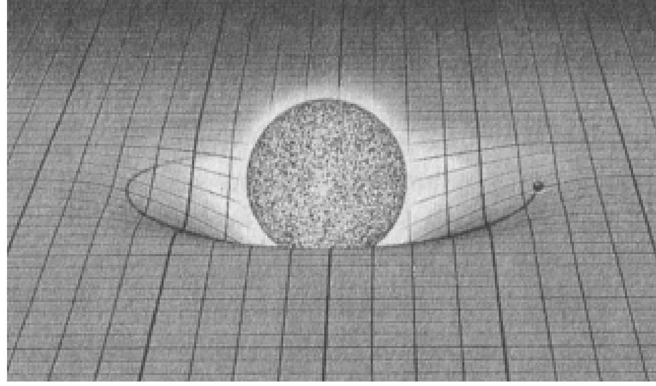
Buyamulma, Güneş'in yakınlarında hareket halinde olan diğer cisimleri de etkiler, çünkü şimdi artık bozulmuş bir uzay dokusundan geçmeleri gerekmektedir. Branda-bovling topu benzetmesini kullanalım yine; brandanın üstüne küçük bir çelik bilye yerleştirip başlangıçta bilyeye bir hız verdiğimizde, bilyenin nasıl bir yol izleyeceği, bovling topunun merkezde durup durmadığına bağlı olur. Bovling topu yoksa, branda düz olur, bilye de düz bir hat üzerinde ilerler. Bovling topu varsa, dolayısıyla brandada yamulmaya sebep oluyorsa bilye eğri bir yol izleyecektir. Aslına bakarsanız, sürtünmeyi bir kenara bıraktığımızda, eğer bilyeyi doğru hızda, doğru doğrultuda hareketlendirirsek, bovling topunun etrafında aynı eğri yol üzerinde ilerleyecektir hep; daha doğrusu "yörüngeye girecektir." Şimdi bu benzetmeyi kütleçekimine uygulayalım.



Şekil 3.4 Güneş gibi büyük bir cisim, uzay dokusunun yamulmasına neden olur; bir bovling topunun plastik bir branda üzerine konmasının yarattığı etkiye benzer bir etkidir bu.

Güneş, tıpkı bovling topunun yaptığı gibi, etrafındaki uzay dokusunu yamultur; Dünyanın hareketi de, tıpkı bilye için olduğu gibi, buyamulmanın şekliyle belirlenir. Dünya, bilye gibi, hızı ve yönelimi uygun değerlere sahipse, Güneş'in çevresinde yörüngeye girecektir. Dünya'nın hareketi üzerindeki bu etkiyi, Güneş'in kütleçekimi etkisi olarak ifade ederiz (Şekil 3.5'te bu etkiyi görebilirsiniz). Aradaki fark, Newton'dan farklı olarak, Einstein'ın kütleçekimini aktaran *mekanizmayı* tanımlamış olmasıdır: Uzayın yamulmasıdır bu mekanizma. Einstein'ın bakış açısına göre. Dünyayı yörüngede tutan

kütleçekimi ipi, Güneş'in anlık gizemli bir eylemi değildir; Güneş'in varlığından ötürü, uzamsal dokunun yamulmasıdır.



Şekil 3.5 Dünya Güneş'in çevresinde yörüngede kalır, çünkü yamulmuş uzay dokusundaki bir yol üzerinde ilerler. Daha açık bir ifadeyle, Güneş'in çevresindeki çarpılmış bölgede "en az direnç gösteren" yolu izler.

Bu tablo, kütleçekiminin iki temel unsurunu yeni bir biçimde anlamamızı sağlıyor. Öncelikle, bovling topunun kütlesi ne kadar büyükse, top brandada o kadar büyük bir çarpılma yaratır; keza Einstein'ın kütleçekimi tanımlamasına göre de, bir cismin kütlesi ne kadar büyükse, etrafındaki uzayda o kadar büyük bir çarpılma yaratır. Bu da, bir cismin kütlesi ne kadar büyükse, başka cisimlere uyguladığı kütleçekimi etkisinin de o kadar büyük olacağı anlamına gelir, deneyimlerimizin bize söylediği de tam olarak budur, İkincisi, tıpkı bovling topunun brandada yarattığı çarpılmanın toptan uzaklaşıldıkça azalmasında olduğu gibi, Güneş gibi kütlesi büyük bir cismin yarattığı uzamsal yamulmanın büyüklüğü de Güneş'e olan uzaklık arttıkça azalır. Bu da yine kütleçekimi kavrayışımızla örtüşüyor; cisimler arasındaki mesafe büyüdükçe kütleçekimi zayıflar.

Önemli bir nokta daha vardır: Bilye de brandayı yamultur, ama bu küçük biryamulma olur. Keza Dünya da, kütleye sahip bir cisim olduğundan uzayın dokusunu yamultur, ama Güneş'in yamulttuğundan çok daha az yamultur. Genel görelilik dilinde, Dünya, Ay'ı işte böyle yörüngede tutar, aynı şekilde her birimizi de

yüzeyine bağlı tutar. Bir serbest paraşütçü, yere doğru düşerken, Dünya'nın kütlesinin uzamsal dokuda neden olduğu bir alçak basınç alanından kaymaktadır. Dahası, her birimiz -kütleye sahip her cisim gibi- vücutlarımızın yakınındaki uzamsal dokuda yamulma yaratırız, gerçi insan vücudu nispeten küçük kütleye sahip olduğundan bu yamulmanın ufacık bir çentikten farkı yoktur.

O halde özetle, Einstein, Newton'un "Kütle çekimi bir aracı etkisiyle ortaya çıkıyor olmalıdır" ifadesine tamamen katılıyordu, Newton'un "okurlarımın değerlendirmesine bırakıyorum," dediği aracının kimliğini belirleme işine girişmişti. Einstein'a göre, kütleçekiminin aracısı kozmosun dokusuydu.

Birkaç Uyarı

Branda-bovling topu benzetmesi yararlıdır, çünkü evrenin uzamsal dokusundaki bir yamulmadan ne kast ettiğimizi somut bir biçimde anlamamızı sağlayacak görsel bir imge sunar bize. Fizikçiler, kütleçekimi ve yamulmayla ilgili sezgilerine kılavuzluk etmesi amacıyla bu ve benzeri benzetmelere sık sık başvururlar. Fakat yararlılığı bir kenara, branda-bovling topu benzetmesi mükemmel değildir, durumun açıklık kazanması için birkaç yetersizliğine dikkat çekmek istiyorum.

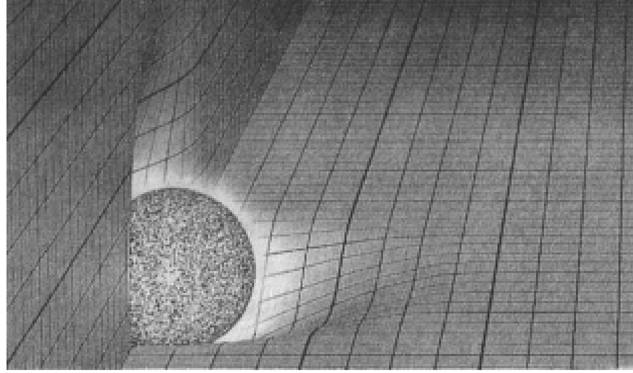
Öncelikle Güneş'in, etrafındaki uzay dokusunda bir yamulma yaratmasının sebebi, brandanın bovling topunun kütleçekimiyle aşağıya doğru çekilip yamulmasında olduğu gibi, kütleçekimiyle "aşağı doğru çekilmesi" değildir. Güneş'in durumunda, "çekim uygulayacak" başka bir cisim yoktur. Einstein bize, uzayın yamulmasının kütleçekimi *olduğunu* öğretmiştir. Uzay, kütleye sahip bir cismin varlığına yamulmayla karşılık verir. Keza, Dünya da, branda üzerindeki bilye örneğinde olduğu gibi, başka bir dış cismin çekimi yamulmuş uzamsal ortamın yollarında ona kılavuzluk ettiği için yörüngede kalıyor değildir. Einstein cisimlerin uzayda (daha doğrusu uzay-zamanda) mümkün olan en kısa yollar ("mümkün olan en kolay yollar" veya "en az direnç gösteren yollar") üzerinde gittiğini göstermişti. Uzay yamulmuşsa, bu yollar eğri olacaktır. Dolayısıyla

branda-bovling topu modeli, Güneş gibi bir cismin etrafındaki uzayı nasıl yamulttuğuna, böylece başka cisimlerin hareketini nasıl etkilediğine dair iyi bir görsel benzetme sunsa da, bu çarpılmaların ortaya çıkmasına yol açan fiziksel mekanizma tümüyle farklıdır. Benzetmemiz, geleneksel Newtoncu çerçevede kütleçekimiyle ilgili sezgimize uysa da, çarpılmalara yol açan fiziksel mekanizma, kütleçekiminin uzayın eğrilmesi üzerinden yeniden formüle edilmesini gerektirir.

Benzetmemizdeki ikinci kusur, brandanın iki boyutlu olmasından kaynaklanır. Gerçekte, gözümüzün önüne getirmek zor olsa da, Güneş (ve kütle sahibi bütün cisimler) etraflarındaki üçboyutlu uzayı yamultur. Şekil 3.6, bunu resmetme yönünde kaba bir girişimdir; Güneş'in etrafındaki -"altındaki", "yanlarındaki", "tepesindeki"- bütün uzay aynı çarpılmaya maruz kalır. Şekil 3.6'da kısmi bir örnekleme görüyorsunuz. Dünya Güneş'in varlığının üçboyutlu uzamsal ortamda yol açtığı yamulma *üzerinde yol* alır. Bu şekli sorunlu bulabilirsiniz; mesela Dünya neden gidip de şekildeki eğri uzayın "dikey kısmına" çarpmıyor? Fakat unutmayın, uzay brandadan farklı olarak, katı bir engel değildir. Şekilde gördüğünüz yamulmuş çizgiler, sizin, Dünya'nın ve başka her şeyin tamamen içine gömülmüş olduğu ve içinde serbestçe hareket ettiği üçboyutlu yamulmuş uzayda sadece birkaç ince dilimlik kısımdır. Belki de, bunun meseleyi kavramayı daha da zorlaştırdığını düşünüyorsunuz. Dokusuna gömülmüşsek uzayı neden *hissetmiyoruz*? Aslında hissediyoruz. Kütle çekimini hissediyoruz, kütleçekimi kuvvetini aktaran araç da uzaydır. Saygın fizikçi John Wheeler'ın kütleçekimini betimlerken sık sık söylediği gibi, "kütle, nasıl yamulacağını söyleyerek uzayı kavrar, uzay da nasıl hareket edeceğini söyleyerek kütleyi kavrar."

Benzetmemizdeki üçüncü eksiklik, zaman boyutunu atlamış olmamızdır. Bunu görsel açıklık sağlamak adına yaptık, çünkü özel görelilik, zaman boyutunu, bildiğimiz üç uzamsal boyutla birlikte düşünmemiz gerektiğini söylese de, zamanı "görmek" son derece güçtür. Fakat Tornado örneğinde görüldüğü üzere, ivme -dolayısıyla kütleçekimi- hem uzayı hem zamanı yamultur. (Aslına bakarsanız, genel görelilik matematiği, Güneş gibi, tipik biryıldızın etrafında

dönen, Dünya gibi, nispeten yavaş hareket eden bir cisim söz konusu olduğunda, zamanın yamulmasının, Dünya'nın hareketi üzerinde, uzayın yamulmasının yol açtığından daha büyük bir etki yaratacağını söyler.) Zamanın yamulması konusuna bir sonraki bölümden sonra tekrar döneceğiz.



Şekil 3.6 Güneş'in çevresindeki yamulmuş üçboyutlu uzay örneği

Bu uyarılar önemlidir elbette, ama bunları aklınızın bir köşesinde tuttuğunuz sürece, branda üzerindeki bovling topu görüntüsünün sunduğu yamulmuş uzay imgesini, Einstein'ın yeni kütleçekimi görüşünün sezgisel bir özeti olarak kullanmanız gayet kabul edilebilir.

Çatışma Çözümü

Einstein uzay ve zamanı etkin oyuncular olarak işe dahil ederek, kütleçekiminin nasıl işlediğine dair açık bir kavramsal görüntü sunmuştu. Fakat asıl sorun, kütleçekimi kuvvetinin bu şekilde yeniden formüle edilmesinin, özel görelilik ile Newton'un kütleçekimi kuramı arasındaki çatışmayı çözüp çözmediğidir. Çözer. Burada branda benzetmesi yine bize temel fikri veriyor. Branda üzerinde bir bovling topu olmadığını, bilyenin düz bir hatta yuvarlanmakta olduğunu düşünelim. Bovling topunu brandanın üstüne yerleştirdiğimizde, bilyenin hareketi bundan etkilenecektir, fakat *anında* değil. Olaylar dizisini filme çekip ağır çekimde izleyecek olursak bovling topunu brandanın üstüne yerleştirmemizin yarattığı etkinin bir havuzdaki dalgacıklar gibi yayılıp nihayetinde bilyeye

ulaştığını görürüz. Kısa süre sonra, yüzeydeki geçici salınımlar kesilir ve hareketsiz, yamulmuş bir branda görürüz karşımızda.

Aynı şey uzayın dokusu için de geçerlidir. Hiç kütle olmadığında uzay düzdür; küçük bir cisim ya sükünet içinde duruyor ya da sabit hız ve doğrultuda hareket ediyor olacaktır. Fakat hal böyleyken büyük kütleli bir cisim sahneye çıkacak olursa uzay yamulur; fakat branda örneğinde olduğu gibi, yamulma heryer-de anında olmayacaktır. Büyük kütleli cisimden dışa doğru yayılacak, nihayetinde yeni cismin kütleçekimine bağlı çekimini aktaran yamulmuş bir şekil oluşturacaktır. Benzetmemizde branda üzerindeki etkiler, brandanın yapıldığı malzemenin izin verdiği bir hızla, branda boyunca yayılır. Gerçek genel görelilik ortamında, bu etkilerin evrenin dokusunda ne kadar hızlı hareket edeceğini Einstein hesaplayabilmiş ve *tam olarak ışık hızında* hareket ettiklerini bulmuştu. Bu da, daha önce tartıştığımız varsayımsal örnekte, Güneş'in ortadan kalkmasının Dünyayı karşılıklı kütle çekimlerinde ortaya çıkan değişikliklerden dolayı etkileyecek olması örneğinde, bu etkinin anında iletilmeyeceği anlamına gelir. Bir cisim konumunu değiştirirse, hatta patlarsa, uzay-zamanın dokusundaki çarpılmanın değişmesine neden olur; bu değişiklik dışarıya doğru ışık hızıyla, yani özel göreliliğin evrensel hız sınırına tam olarak uyan bir hızla yayılır. Dolayısıyla bizler Dünya'da, Güneş'in patladığını, bu durumun kütleçekimine bağlı sonuçlarını hissetmeye başladığımız anda görürüz; patlamasından sekiz dakika sonra yani. Einstein'ın formülasyonu böylece çatışmayı çözer: Kütle çekiminin etkileri fotonlara ayak uydurur, onları geçmez.

Zamanın Yamulması, Yeniden

3.2, 3.4 ve 3.6 numaralı şekillerdeki gibi çizimler, "yamulmuş uzay"ın ne anlama geldiğini özü itibarıyla yakalıyor. Bir yamulma uzayın şeklinde çarpılma yaratır. Fizikçiler, "zamanın yamulmasının" anlamını aktarabilmek için de benzer imgeler geliştirmişlerdir, fakat bunları yorumlamak çok daha zor olduğundan, burada o imgelere girmeyeceğiz. Onun yerine Slim ile Jim'in Tornadoya bindikleri

örnekle devam edelim ve kütleçekiminin etkisiyle zamanın yamulması deneyimini anlamaya çalışalım.

Bunu yapabilmek için önce George ile Gracie yi bir kere daha görelim; artık boş uzayın karanlık derinliklerinde değiller, Güneş sisteminin sınırlarına yakın bir yerlerde dolanıyorlar, ikisinin de uzay elbiselerinde yine büyük dijital saatler bulunuyor, başta bu saatler senkronize. işleri basitleştirmek için, gezegenlerin etkilerini görmezden geliyoruz, yalnızca Güneş'in kütleçekimi alanını dikkate alıyoruz. Diyelim ki, yanlarına yaklaşan bir uzay gemisi, Güneş'in yüzeyinin yakınlarına dek uzanan uzun bir halat saldı. George bu halatı kullanarak yavaş yavaş Güneş'e doğru inmeye başlıyor. Bunu yaparken düzenli aralıklarla duruyor, Gracie yle birlikte zamanın ne hızla geçtiğini kıyaslamak için saatlerine bakıyorlar. Einstein'ın genel görelilik kuramının öngördüğü üzere zamanın yamulması, George'un deneyimlediği kütleçekimi alanı güçlendikçe saatinin de Gracie'nin saatine göre giderek yavaşlayacağı anlamına geliyor. Başka bir deyişle George Güneş'e ne kadar yaklaşırsa, saati o kadar yavaş işleyecektir. İşte kütleçekimi bu anlamda, uzayın yanı sıra zamanı da yamultur.

Dikkat etmeniz gereken bir nokta var: II Bölüm'de, George ile Gracie'nin boş uzayda sabit hız ve doğrultuda birbirlerine göre hareket halinde olduğu örnekten farklı olarak bu örnekte aralarında bir simetri yoktur. George, Gracie'den farklı olarak kütleçekimi kuvvetinin giderek güçlendiğini *hisseder,* Güneş'e yaklaştıkça, içine çekilmekten kurtulması için halatı giderek daha sıkı tutması gerekir. George'un saatinin yavaşladığı konusunda hemfikirler. Rollerini değiştiren, bu durumu tersine çeviren "aynı oranda geçerli bir başka bakış açısı" yoktur. Aslına bakarsanız, II. Bölüm'de, George, Gracie'yi yakalamak için tepkili motorunu çalıştırıp ivmelendiğinde de karşılaştığımız şey buydu. George'un hissettiği ivme, saatinin Gracie'ninkine göre açıkça yavaş işlemesine yol açmıştı. İvmeli hareketi hissetmenin, bir kütleçekimi kuvvetini hissetmekle aynı şey olduğunu artık bildiğimiz için, George'un şu anda halat üzerindeki durumunun da aynı ilkeye tabi olduğunu, saatinin de, hayatındaki

başka her şeyin de Gracie'nin durumuna kıyasla yavaş işlediğini görüyoruz.

Güneş gibi sıradan bir yıldızın yüzeyindeki kütleçekimi alanında, saatlerdeki yavaşlama çok az olacaktır. Gracie, diyelim ki Güneş'ten bir buçuk milyar kilometre uzakta, George da Güneş'in yüzeyinin birkaç kilometre yakınında olsa, George'un saatinin tıklama hızı, Gracie'nin saatinin tıklama hızının yüzde 99,9998'ine eşit olacaktır. Yavaş, fakat çok çok da yavaş değil. Fakat George, kütlesi kabaca Güneş'in kütlesine eşit, ama hacmi küçük, dolayısıyla yoğunluğu Güneş'in yoğunluğundan milyon kere milyar kere daha büyük bir nötron yıldızının yüzeyine yaklaşacak şekilde halattan iniyor olsa, kütleçekimi alanının daha büyük olması, saatinin Gracie'nin saatinden yüzde 76 daha yavaş işlemesine yol açacaktır. Kara deliklerin dışındakilere benzer daha güçlü kütleçekimi alanları zamanın daha da yavaş işlemesine yol açar; daha güçlü kütleçekimi alanları, zamanda daha ciddi bir yamulma yaratır.

Genel Göreliliğin Deneysel Olarak Doğrulanması

Genel görelilik üzerine çalışan çoğu insan onun estetik zarafetine kapılmıştır. Newtoncu o soğuk ve mekanik uzay, zaman ve kütleçekimi kavrayışının yerine Einstein, eğri bir Uzay-zaman gerektiren dinamik ve geometrik bir betimleme geçirerek, kütleçekimini evrenin temel dokusuna işlemiştir. Kütle çekimi ek biryapı olarak dayatılmak yerine, en temel düzeyde evrenin bir parçası haline gelmiştir. Uzay ve zamana hayat verip eğrilmelerini, yamulmalarını ve dalgalanmalarını mümkün kılmak, yaygın olarak kütleçekimi dediğimiz şeyle sonuçlanmıştır.

Estetiği bir kenara bırakacak olursak, bir fizik kuramının nihai sınavı, fiziksel olguları doğru bir biçimde açıklayıp öngörebilirle becerisinde yatar. Newton'un kütleçekimi kuramı, 1600'lerin sonunda ortaya çıkışından bu yüzyılın başlarına dek, bu sınavı büyük bir başarıyla geçmiştir. İster havaya fırlatılan toplara uygulansın, ister eğik kulelerden atılan cisimlere, ister Güneş'in etrafında dönen kuyrukluyıldızlara ya da Güneş'in çevresinde yörüngede olan

gezegenlere, Newton'un kuramı bütün gözlemlere son derece geçerli açıklamalar getirirken, dayanağı olduğu tahminler de birçok durumda ve sayılamayacak kadar çok kereler doğrulanmıştır. Deneysel olarak son derece başarılı olan bu kuramın sorgulanmasını gerektiren şeyin, kütleçekimi kuvvetinin anında aktarılması özelliği ile özel göreliliğe ters düşmesi olduğunu vurgulamıştık.

Uzay, zaman ve harekete dair temel bir kavrayış açısından merkezi önemde olsa da, özel göreliliğin etkileri, içinde yaşadığımız yavaş dünyada son derece azdır. Keza, Einstein'ın genel göreliliği (özel görelilikle uyumlu bir kütleçekimi kuramı) ile Newton'un kütleçekimi kuramı arasındaki sapmalar, çoğu sıradan durumda son derece küçüktür. Bu hem iyidir, hem de kötüdür. İyidir, çünkü Newton'un kütleçekimi kuramının yerine geçmeye çalışan bir kuram, Newton'un kuramının deneysel olarak doğrulandığı alanlara uygulandığında onunla uyuşsa iyi olur. Kötüdür, çünkü iki kuram arasında deneylere dayalı bir karara varmayı zorlaştırmaktadır. Newton'un kuramıyla Einstein'ın kuramını birbirinden ayırmak, iki kuramın birbirinden farklılaştığı noktalara çok duyarlı deneylere uygulanmış son derece hassas ölçümler yapmayı gerektirir. Bir beysbol topu fırlattığınızda nereye düşeceğini bulmak için Newtoncu kütleçekimi kuramı da, Einsteincı kütleçekimi kuramı da kullanılabilir, cevapları farklı olacaktır, fakat bu farklılık o kadar küçük olacaktır ki genellikle deneysel olarak saptayabilme yetimizin ötesindedir. Daha akıllıca bir deneye ihtiyaç vardır ve Einstein da böyle bir deney önermiştir.

Yıldızları gece görürüz, ama tabi gündüz de oradadırlar. Güneş'in yaydığı ışık, onların o uzak, topluiğne başı büyüklüğündeki ışıklarını bastırdığı için onları genelde göremeyiz. Fakat bir Güneş tutulması sırasında, Ay geçici olarak Güneş'in ışığını keser ve uzak yıldızlar görülebilir hale gelir. Yine de Güneş'in varlığının hâlâ bir etkisi vardır. Uzak yıldızların bazılarından gelen ışık, Dünyaya doğru gelirken Güneş'in yakınlarından geçmek zorundadır. Einstein'ın genel görelilik kuramı, Güneş'in etrafındaki uzay ve zaman dokusunu yamultacağı, bu çarpmanın da *yıldızların ışığının izleyeceği yolu etkileyeceği* öngörüsünde bulunur. Nihayetinde uzak kaynaklardan gelen fotonlar,

evrenin dokusu boyunca yol alırlar; doku yamulursa, fotonların hareketi de bundan maddi bir cisim kadar etkilenecektir. En fazla da, Dünyaya gelirken yol üzerinde Güneş'i sıyırıp geçen ışık sinyallerinin yolu bükülecektir. Bir Güneş tutulması, Güneş'i sıyırıp geçen bu yıldız ışıklarını, güneş ışığı tarafından bastırılmadan görmemizi sağlayacaktır.

Işığın izlediği yolun bükülme açısı basit bir biçimde hesaplanabilir. Işığın izlediği yolun bükülmesi, yıldızın *görünürdeki* konumunda bir kaymayayol açar. Bu kayma, yıldızın bu görünürdeki konumunu, tutulmadan altı ay önce veya sonra Dünya uygun bir konumda olduğu sırada, geceleri yapılan gözlemlerden (Güneş'in yamulma yaratan etkisi olmaksızın) öğrenilen gerçek konumuyla karşılaştırarak kesin bir biçimde ölçülebilir. Einstein Kasım 1915'te yeni kütleçekimi kavrayışını kullanarak Güneş'i sıyırıp geçen yıldız ışıklarının bükülme açısını hesapladı ve yaklaşık 0,00049 derece (1,75 arksaniye, bir arksaniye bir derecenin 1/3600'üne eşittir) olarak buldu. Bu açı, yaklaşık 3 kilometre uzaktan bakılan, dik duran, çapı 2,5 santimetre olan bir bozuk paranın açısal yüksekliği kadardır. Böyle küçük bir açının tespit edilebilmesi, o günün teknolojik imkânları dahilindeydi. Greenwich Gözlemevinin yöneticisi Sir Frank Dyson'ın uyarısı üzerine tanınmış gökbilimci ve İngiltere Kraliyet Gökbilim Cemiyetinin sekreteri Sir Arthur Eddington, Einstein'ın tahminini 29 Mayıs 1919'daki Güneş tutulması sırasında test etmek üzere Batı Afrika sahili açıklarındaki Principe Adasına bir araştırma gezisi düzenledi.

6 Kasım 1919'da, tutulma sırasında Principe'de çekilen fotoğrafların (ve Charles Davidson ile Andrew Crommelin liderliğindeki ikinci bir İngiliz ekibin Brezilya'da Sobra1'de çektiği fotoğrafların) incelenmesinden beş ay sonra, Kraliyet Cemiyeti ile Kraliyet Gökbilim Cemiyeti'nin ortak bir toplantısında Einstein'ın genel göreliliğe dayanarak yaptığı tahminlerin doğrulandığı açıklandı. Bu başarının -önceki uzay ve zaman kavrayışlarının tümüyle yerle bir olduğu- haberi çok geçmeden fizik camiası dışında dayayıldı ve Einstein dünya çapında meşhur bir kişilik haline geldi. 7 Kasım 1919'da *London Times'ın* manşetinde "BİLİMDE DEVRİM: YENİ BİR

EVREN KURAMI, NEWTONCU FİKİRLER YIKILDI" deniyordu.“ Einstein'ın zafer anıydı bu.

Bu deneyi izleyen yıllarda, Eddington'ın genel göreliliği doğrulaması bazı eleştirel incelemelere tabi tutuldu. Ölçümün çok sayıda zor ve incelikli yönü olması, yeniden gerçekleştirilmesini zorlaştırıyor, özgün deneyin güvenilirliğiyle ilgili bazı sorular yaratıyordu. Son 40 yılda, teknolojik ilerlemelerden yararlanılan çeşitli deneylerle genel görelilik pek çok bakımdan hassas bir biçimde sınandı. Genel göreliliğin tahminleri tümden doğrulandı. Einstein'ın kütleçekimi betimlemesinin özel görelilikle uyuşmasının ötesinde, tahminlerinin deneye dayalı sonuçlara, Newton'un kuramına dayanan tahminlerden daha yakın olduğuna da kuşku yoktur artık.

Kara Delikler, Büyük Patlama ve Uzayın Genişlemesi

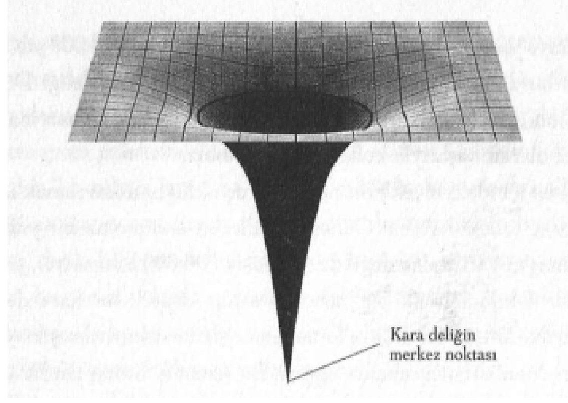
Özel görelilik, şeyler hızla hareket ettiğinde en açık biçimde görülebilir, genel görelilikse şeylerin kütlesi çok büyük olduğunda, buna bağlı olarak da uzay ve zamanda ciddi yamulmalar meydana geldiğinde en açık biçimde görülür. Bunu iki örnekle açıklayalım.

İlki, Alman gökbilimci Kari Scbwarzschild'ın I. Dünya Savaşı sırasında Rus cephesinde top güllelerinin izlediği yola dair hesaplamaları sırasında Einstein'ın kütleçekimiyle ilgili bulgularını incelerken yaptığı bir keşifti. Einstein'ın genel görelilik kuramının son rötuşlarını yapmasından yalnızca birkaç ay sonra, Schwarzschild'ın, mükemmel derecede küresel bir yıldızın çevresinde uzay ve zamanın nasıl yamulacağına dair eksiksiz, yanlışsız bir anlayışa varabilmek için bu kuramı kullanabilmiş olması dikkat çekicidir. Schwarzschild elde ettiği sonuçları Rus cephesinden Einstein'a göndermiş, o da bunları Schwarzschild adına Prusya Akademisi'ne sunmuştu.

Schwarzschild'ın çalışması -bugün artık "Schwarzschild çözümü" olarak bilinmektedir- Şekil 3.5'te şematik olarak gösterilen yamulmayı doğrulamanın ve matematiksel olarak kesinleştirmenin

ötesinde, genel göreliliğin çarpıcı bir içerimini ortaya koymuştu. Schwarzschild, bir yıldız, kütlesinin yarıçapına bölümünün belli bir kritik değeri aşacağı kadar küçük bir küresel bölgede yoğunlaştıysa eğer, ortaya çıkan uzay-zaman yamulma-sının çok büyük olacağını, öyle ki, yıldızın yanınayaklaşan, ışık dahil *hiçbir şeyin* yıldızın kütleçekimi kuvvetinden kaçamayacağını göstermişti. Işık dahi böyle "sıkıştırılmış yıldızlardan" kaçamayacağı için, başta bu yıldızlara *karanlık* ya da *donmuş yıldızlar* denmişti. Yıllar sonra John Wheeler daha cazip bir isim uydurup onlara *kara delikler* diyecekti; kara, çünkü ışık saçmazlar; delik, çünkü yanlarına çok yaklaşan her şey içlerine düşer ve bir daha çıkamaz. Bu isim tuttu.

Schwarzschild'ın çözümünü Şekil 3.7'de gösteriyoruz. Kara delikler, açgözlülükleriyle meşhur olsalar da, "enıniyetli" bir mesafeden yanlarından geçen cisimler, sıradan biryıldızdan etkilenmelerine çok benzer biçimde kara delikten etkilenip saadet içinde yollarına devam edebilirler. Fakat bileşimleri ne olursa olsun, yanlarına çok yaklaşan -kara deliğin *olay ufku* denen şeyi aşacak kadar yaklaşan- cisimler feci sonlarına adım atar: Kaçınılmaz biçimde kara deliğin merkezine doğru çekilirler ve giderek artan, nihayetinde yıkıcı bir kütleçekimi gerilimine maruz kalırlar. Örneğin olay ufkuna önce ayaklarınız girerse, kara deliğin merkezine yaklaşırken kendinizi giderek daha rahatsız hissedersiniz. Kara deliğin kütleçekimi kuvveti o kadar artacaktır ki, ayağınızın maruz kaldığı çekim, başınızın maruz kaldığı çekimden çok çok daha güçlü olacaktır (çünkü önce ayaklarınız düştüğünde, ayaklarınız kara deliğin merkezine her zaman başınızdan biraz daha yakın olur): O kadar güçlü olacaktır ki, aslına bakarsanız vücudunuzu hızla parçalara ayıracak bir kuvvetle gerileceksinizdir.



Şekil 3.7 Bir kara delik, etrafındaki uzay-zaman dokusunda o kadar ciddi biryamulma-ya sebep olur kî, "olay ufku"na -koyu renkli daireyle gösterilmiştir- giren hiçbir şey kara deliğin kütleçekiminden kaçamaz. Bir kara deliğin en derin noktasında tam olarak neler olduğunu hiç kimse bilmiyor.

Öte yandan, bir kara delik civarında dolanırken daha temkinli davranıp olay ufkunu aşmamaya büyük özen gösterirseniz, kara delikle inanılmaz başarılara imza atabilirsiniz. Örneğin, kütlesi Güneş'in kütlesinden 1000 kat daha büyük bir kara delik keşfettiğinizi, tıpkı George'un Güneş'in yakınlarında yaptığı gibi, sizin de bir halata tutunup kara deliğin olay ufkunun 2-3 santimetre yakınına kadar sokulduğunuzu düşünelim. Biraz evvel tartıştığımız üzere kütleçekimi alanları zamanda yamulma yaratır, bu da sizin zamanın içinden geçişinizin yavaşlayacağı anlamına gelir. Aslına bakarsanız, kara delikler çok güçlü kütleçekimi alanlarına sahip olduklarından, zamanın içinden geçişiniz *bir hayli* yavaşlayacaktır. Saatiniz, geride, Dünya'da bıraktığınız arkadaşlarınızın saatlerinden 10.000 kat dahayavaş işleyecektir. Kara deliğin olay ufku üzerinde bu şekilde bir yıl kadar oyalansanız, sonra halata tırmanıp sizi bekleyen uzay geminize dönseniz, kısa süren rahat bir yolculukla eve varsanız.

Dünyaya geldiğinizde, yola çıkışınızdan bu yana 10.000 yılı aşkın bir zaman geçtiğini görürdünüz. Böylece kara deliği Dün-ya'nın uzak geleceğine gitmenizi sağlayan bir tür zaman makinesi olarak başarıyla kullanmış olurdunuz.

İşin içindeki ölçeklerin ne kadar uç olduğunu kavramak için birkaç örnek verelim: Güneş'in kütlesine sahip olan bir yıldız, Güneş'in yarıçapına değil de (yaklaşık 700.000 kilometre), yaklaşık 3 kilometrelik bir yarıçapa sahip olsaydı bir kara delik olurdu. Düşünün: Güneş'in tamamı öyle bir sıkıştırılmış ki, yukarı Manhattan'a rahatça sığıyor. Bu sıkışmış Güneş'ten bir tatlı kaşığı büyüklüğünde bir parça, Everest Dağı kadar ağır olacaktır. Dünyayı bir kara deliğe çevirebilmemiz için, büyüklüğünü yarıçapı neredeyse 1 santimetre olan bir küreye indirmemiz gerekirdi. Fizikçiler, böyle uç konfigürasyonlarda maddelerin gerçekte var olup olamayacağından uzunca bir süre boyunca kuşkulanmışlar, birçoğu kara delikleri aşırı çalışan bir kuramcının hayal gücünün eseri olarak görmüştür.

Yine de son on yıl içinde, kara deliklerin varlığına işaret eden, daha ikna edici deneysel kanıtlar toplanmıştır. Kara oldukları için gökyüzünün doğrudan teleskoplarla taranması sonucu görülemezler tabi ki. Gökbilimciler de, kara delikleri ararken, ışık saçan, sıradan yıldızların davranışlarındaki anormallikleri araştırırlar, bu anormallikler kara deliğin olay ufkunun hemen dışında konumlanmış olmalarına bağlı olabilir. Örneğin, kara deliğin yakınlarındaki sıradan yıldızların dış katmanlarındaki toz ve gaz, kara deliğin olay ufkuna doğru düşerken, neredeyse ışık hızına yakın bir ivme kazanır. Bu hızlarda, aşağıya doğru girdap oluşturan maddenin içindeki sürtünme, inanılmaz boyutlarda bir ısı üretir, böylece toz ve gaz karışımının hem sıradan görünebilir ışık, hem de X ışınları yayarak "parlamasına" yol açar. Bu ışıma olay ufkunun hemen dışında meydana geldiğinden, kara delikten kaçıp uzayda yol alabilir, dolayısıyla doğrudan gözlenip incelenebilir. Genel görelilik, bu tür X ışını salımlarının sahip olacağı özellikler konusunda ayrıntılı tahminlerde bulunur; tahmine dayalı bu özelliklerin gözlenmesi de, kara deliklerin varlığına dair dolaylı olsa da, güçlü kanıtlar sunar. Örneğin giderek çoğalmakta olan kanıtlar, bizim Samanyolu galaksimizin tam ortasında, kütlesi Güneş'in kütlesinden 2,5 milyon kat daha büyük, devasa bir kara delik bulunduğuna işaret etmektedir. Gel gelelim, bu görünüşte heybetli kara delik bile, gökbilimcilerin düşüncesine göre kozmosun dört bir yanına dağılmış şaşırtıcı derecede parlak kuasarların ortasında bulunan, kütleleri Güneş'in

kütlesinden *milyarlarca* kat büyük kara deliklerin yanında sönük kalmaktadır.

Schwarzschild, kendi adını taşıyan çözümü bulmasından birkaç ay sonra, Rus cephesinde kaptığı bir deri hastalığı yüzünden öldü. 42 yaşındaydı. Einstein'ın kütleçekimi kuramıyla trajik derecede kısa süren karşdaşması, doğal dünyanın en çarpıcı ve gizemli yanlarından birini meydana çıkarmıştı.

Genel göreliliğin, gücünü göstermiş olduğu ikinci bir örnek de, bütün bir evrenin kökeni ve evrimiyle ilgilidir. Daha önce bahsettiğimiz gibi, Einstein uzay ve zamanın kütle ve enerjinin varlığına tepki verdiğini göstermişti. Uzay-zamanın çarpılması, ortaya çıkan yamulmaların yakınlarındaki kozmik cisimlerin hareketlerini etkiler. Buna karşılık bu cisimlerin kendi kütleleri ve enerjilerine bağlı olan hareketleri de, uzay-zamanın yamulmasını etkiler, bu etki de cisimlerin hareketini etkiler bir kez daha; böylece hareketlerin birbirine bağlı olduğu kozmik dans devam edip gider. Genel görelilik denklemleri ve 19. yüzyılın büyük matematikçisi Georg Bernhard Riemann'ın öncülük ettiği, eğri uzaya dair geometrik kavrayışlara uzanan denklemler sayesinde, Einstein uzay, zaman ve maddenin karşılıklı evrimini niceliksel olarak betimleyebilmişti. Bu denklemler, evrende bir yıldızın etrafında dönen bir gezegen veya kuyrukluyıldız gibi yalıtılmış bağlamların dışında, evrenin tamamına uygulandığında kendisini de çok şaşırtan dikkat çekici bir sonuca ulaşılıyordu: *Uzamsal evrenin büyüklüğü zamanla değişiyor olmalıydı.*

Yani evrenin dokusu ya genişliyordu, ya küçülüyordu, ama kesinlikle aynı kalmıyordu. Genel görelilik denklemleri bunu açıkça gösteriyordu.

Bu sonuç, Einstein'a bile fazla ağır geldi. Uzayın ve zamanın dokusuyla ilgili, binlerce yıllık gündelik deneyimlerle oluşturulmuş genel sezgiyi alt üst etmişti, fakat her zaman var olan, hiç değişmeyen evren kavramı o kadar derinlere işlemiş bir kavramdı ki, bu radikal düşünür bile bundan vazgeçmekte zorlandı. Bu yüzden, Einstein denklemlerini yeniden gözden geçirip *kozmolojik sabit*

olarak bilinen bir şeyi dahil ederek denklemlerini değiştirdi. *Kozmolojik sabit,* Einstein'ın evrenin boyutlarının değiştiği öngörüsünden kaçınmasını ve bir kez daha durağan evren fikrinin rahatlığına gömülmesini mümkün kılmıştı. Gel gelelim 12 yıl sonra, Amerikalı gökbilimci Edwin Elubble, uzak galaksilere ilişkin ayrıntılı ölçümler yaparak, evrenin *genişlediğini* deneysel olarak kanıtladı. Bilim tarihinde artık meşhur olan bir hikâyeye göre de, Einstein bundan sonra denklemlerini ilk hallerine döndürdü; onları bir süreliğine değiştirmiş olmasını da hayatının en büyük hatası olarak niteledi. Vardığı sonucu kabul etme konusunda başta gösterdiği isteksizlik bir kenara bırakılacak olursa, Einstein'ın kuramı evrenin genişlediğini öngörüyordu. Aslına bakarsanız, 1920'lerin başında -Hubble'ın ölçümlerinden yıllar önce- Rus meteorolog Alexander Friedmann, Einstein'ın özgün denklemlerini kullanarak bütün galaksilerin genişlemekte olan uzamsal dokunun altkatmanlarında taşınacağını, böylece hızla diğer galaksilerden uzaklaşacağını ayrıntılı olarak göstermişti. Genel göreliliğin bu şaşırtıcı sonucu Elubble'ın gözlemleri ve daha sonra yapılan sayılamayacak kadar çok gözlemle kapsamlı olarak doğrulamıştır. Einstein evrenin genişlediğine dair açıklamasıyla, tüm zamanların en büyük entelektüel başarılarından birine imza atmıştı.

Uzayın dokusu genişliyor, böylece kozmik akışla taşınan galaksiler arasındaki uzaklık artıyorsa, evrenin başlangıcını öğrenebilmek için bu gelişmeyi zaman içinde geri çevirdiğimizi hayal edebiliriz. Tersinden baktığımızda evrenin dokusu küçülür, bütün galaksiler giderek birbirine yaklaşır. Bir düdüklü tencerenin içinde olduğu gibi, evrenin büzülmesi galaksileri bir araya getirip sıkıştıracağından sıcaklık ciddi oranda yükselir, yıldızlar parçalanır ve maddenin ilk bileşenlerini içeren sıcak bir plazma oluşur. Doku küçülmeyi sürdürdükçe, hem sıcaklık hızını kesmeden yükselir, hem de ilk plazmanın yoğunluğu artar. Saati geriye doğru işlettiğimizi, evrenin bugün gözlediğimiz halinden 15 milyar yıl önceye gittiğimizi düşünelim, bugün bildiğimiz haliyle evren, çok küçük bir boyuta inecektir. *Her şeyi* -bütün otomobilleri, binaları, yeryüzündeki dağları, Dünya'nın kendisini, Ay'ı, Satürn'ü, Jüpiter'i, diğer bütün gezegenleri; Güneş'i ve Samanyolu'ndaki başka yıldızları; 100 milyar yıldızın

bulunduğu Andromeda Galaksisi'ni, sayıları 100 milyarı aşkın diğer bütün galaksileri- oluşturan madde, kozmik bir mengeneyle sıkıştırılıp dudak uçuklatan bir yoğunluğa ulaşacaktır. Saatimiz geri gidip daha da önceki zamanlara ulaştığında, evrenin tamamı sıkışıp bir portakal, bir limon, bir bezelye, bir kum tanesi büyüklüğüne, sonra daha da küçük bir boyuta inecektir. Ta "başlangıca" kadar tahminlerde bulunduğumuzda, evren, bütün madde ve enerjinin hayal edilemez yoğunlukta ve sıcaklıkta sıkıştığı *bir nokta* olarak -sonraki bölümlerde eleştirel bir gözle yeniden inceleyeceğimiz bir imgedir bu- başlamış gibi görünecektir. Bu gaz halindeki karışımdan, bildiğimiz haliyle evrenin geliştiği tohumları saçan kozmik bir ateş küresi oluştuğu -Büyük Patlama- düşünülmektedir.

Patlayan bir bombadan saçılan şarapneller gibi, evrenin maddi içeriğini saçan kozmik bir patlama olarak Büyük Patlama imgesi, akılda tutulması yararlı bir imgedir, ama biraz yanıltıcıdır. Bir bomba patladığında, *uzayda* belli bir yerde, *zamanda* belli bir anda patlar. İçindekiler çevresindeki uzaya dağılır. Oysa Büyük Patlama'da çevreleyen bir uzay yoktu. Filmi geri sarıp evrenin başlangıcına uzandığımızda, bütün maddi içeriğin sıkışması, *uzayın tamamının* küçülmesi yüzünden ortaya çıkar. Portakal büyüklüğü, bezelye büyüklüğü, kum tanesi büyüklüğü, evrenin içinde bir şeyi değil, evrenin *tamamını* tanımlar. Başa dönecek olursak, ilk noktasal "bomba" dışında bir uzay yoktu. Büyük Patlama, sıkışmış uzayın patlamasıdır, uzayın bir gelgit dalgası gibi yayılması, madde ve enerjiyi bugünlere kadar taşımıştır.

Genel Görelilik Doğru mudur?

Bugünkü teknolojik düzeyimizle gerçekleştirilen deneylerde, genel göreliliğin tahminlerinde bir sapma görülmemiştir. Daha da hassas deneylerin sapmalar saptayıp saptayamayacağı zaman içinde belli olacaktır; o zaman bu kuramın da doğanın aslında nasıl işlediğine dair yaklaşık bir betimleme olduğu ortaya çıkacaktır. Kuramların giderek daha hassas biçimde sınanmaları, bilimsel ilerlemenin bir yoludur kuşkusuz, fakat tek yolu değildir. Aslına bakarsanız şunu zaten görmüştük: Yeni bir kütleçekimi kuramı arayışı, Newton'un

kuramının deneysel olarak çürütülmesiyle değil, Newtoncu kütleçekimi kuramının başka bir *kuramla,* özel görelilik kuramıyla çatışması sonucu başlamıştı. Newton'un kuramındaki deneysel açıklar, ancak rakip bir kütleçekimi kuramı olarak genel göreliliğin keşfinden sonra, iki kuramın farklılaştığı, küçük ama ölçülebilir yönlerin araştırılmasıyla tanımlanabilmiştir. Dolayısıyla deneysel verilerin yaptığı gibi, kuramlar arasındaki tutarsızlıklar da ilerlemeye öncülük edebilir.

Geçen yarım yüzyıl içinde, fizik, en az özel görelilik ile Newtoncu kütleçekimi kuramları arasındaki çatışma kadar ciddi başka bir kuramsal çatışmayla karşı karşıya kaldı. Genel görelilik son derece iyi sınanmış başka bir kuramla, kuantum mekaniğiyle temel bir uyuşmazlık içinde gibi görünüyor. Bu bölümde ele aldığımız konularla ilgili olarak, bu çatışma fizikçilerin, Büyük Patlama anında olduğu gibi ya da bir kara deliğin merkezindeki gibi sıkıştıklarında uzay, zaman ve maddeye aslında ne olduğunu anlamasını engellemektedir. Fakat daha genel olarak bu çatışma, doğayı kavrayışımızdaki temel bir kusur hakkında bizi uyarmaktadır. Bazı büyük kuramsal fizikçilerin, çatışmanın çözülmesi yönündeki girişimleri boşa çıkmış, dolayısıyla genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki bu kuramsal çatışma, modern kuramsal fiziğin ana sorunu olarak betimlenerek hak edilmiş bir üne kavuşmuştur. Bu çatışmayı anlayabilmemiz, şimdi anlatmaya başlayacağımız kuantum kuramının bazı temel unsurlarına aşina olmamızı gerektiriyor.

IV. Bölüm

Mikroskobik Tuhaflık

George ile Gracie, Güneş sistemi sınırlarının dışına çıktıkları uzay seyahatlerinden biraz yorulmuş halde Dünyaya dönerler ve yorgunluk atmak üzere bir şeyler içmek için H-Bar'ın yolunu tutarlar. George her zamanki içkileri söyler -kendisine papaya sulu buzlu bir viski ve Gracie için de bir votka tonik- ve sonra ellerini başının arkasına dayayıp sandalyesine yaslanarak yenice yaktığı purosunun keyfini çıkarmaya koyulur. Fakat dumanı tam içine çekecekken, şaşkınlık içinde puronun dişlerinin arasında olmadığını fark eder. Puronun bir şekilde ağzından düşmüş olması gerektiği düşüncesiyle, gömleği ya da pantolonunda yanan bir delik göreceğini sanarak doğrulur. Fakat ortalıkta puro yoktur. Bulunabilecek gibi görünmez de. George'un telaşıyla hareketlenen Gracie göz kesilir ve puronun George'un sandalyesinin tam *arkasındaki* tezgâhın üzerinde durduğunu fark eder. "Tuhaf," der George, "nasıl olur da oraya düşebilir? Sanki kafamın içinden geçmiş gibi ama dilim yanmadı, başka bir deliğim varmış gibi de görünmüyor." Gracie, George'u inceler ve biraz gönülsüzce, dilinin ve başının gayet normal göründüğünü doğrular, içkiler geldiğinde, George ile Gracie omuz silkerek, düşmüş puroyu yaşamın küçük gizemleri arasındaki yerinde bırakırlar. Ancak H-Bar'daki tuhaflıklar devam etmektedir.

George papaya suyuna bakar ve içindeki buz küplerinin dönüp durduğunu fark eder; çarpışan arabalar gibi birbirlerine ve bardağın kenarlarına çarpıp durmaktadırlar. George bu sefer yalnız değildir. Gracie de, George'unkinin aşağı yukarı yarısı büyüklüğündeki bardağını kaldırır ve her ikisi de bardaktaki buz küplerinin George'un bardağındakilerden çok daha hareketli bir şekilde döndüğünü görürler. Öyle ki, bütün buzlar dönerek bir kütle oluşturduğundan, onları ayrı ayrı güçlükle seçmektedirler. Fakat sonra olanlar yanında bunlar bir şey değildir. George ile Gracie gözleri fal taşı gibi açılmış, Gracie'nin bardağına bakıp dururken tek bir buz küpünün bardağın içinden *geçip* bara düştüğünü fark ederler. Düşmemesi için

kaptıklarında, bardağın sapasağlam olduğunu görürler; buz küpü bir şekilde hiç hasar vermeden bardağın içinden geçmiştir. "Uzay yürüyüşü sonrasında yaşanan halüsinasyonlardan biri olmalı," der George. Her ikisi de, çarpışan buz küplerinin taşkınlığını içkilerini bir dikişte bitirerek savuşturur ve eve gidip dinlenmek üzere ayaklanırlar. Fakat bardan bir an önce ayrılma telaşıyla, barın duvarına boyanmış dekoratif bir kapıyı gerçek sandıklarının her ikisi de farkında değildir. Öte yandan, insanların duvarlardan geçip gitmelerine fazlasıyla alışkın olan H-Bar'ın patronları, George ile Gracie'nin beklenmedik kalkışlarının farkına varmazlar bile.

Bundan bir asır önce Conrad ile Freud karanlığın yüreği ile ruhunu aydınlatırken, Alman fizikçi Max Planck kuantum mekaniği üzerine ilk ışık demetini düşürdü. Başka şeylerin yanı sıra George ile Gracie'nin H-Bar deneyimlerinin de -mikrodünya ölçülerine vurulduğunda- karanlık bazı yetilere atfedilmemesi gerektiğini ilan eden kavramsal bir çerçeveydi bu. Alışık olmadığımız bu tür tuhaf olaylar evrenimizin son derece küçük ölçeklerdeki genel davranış biçimidir aslında.

Kuantum Çerçevesi

Kuantum mekaniği evrenin mikro özelliklerini anlamaya yönelik kavramsal bir çerçevedir. Nasıl ki, şeylerin çok hızlı hareket ettiği ya da çok kütleli olduğu durumlarda özel görelilik ve genel görelilik dünya görüşümüzde ciddi değişikliklere gitmemizi gerektiriyorsa, kuantum mekaniği de atomik ve atomaltı mesafe ölçeklerinde incelendiğinde, evrenin daha çarpıcı değilse de, aynı derecede çarpıcı özelliklere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Kuantum mekaniğiyle uğraşan en büyük isimlerden biri olan Richard Feynman 1965'te şunları yazıyordu:

Bir zamanlar gazeteler, sadece 12 kişinin görelilik kuramını anlayabildiğini yazdı. Ben, böyle bir zaman olduğuna inanmıyorum. Belki sadece bir tek kişinin görelilik kuramını anladığı bir zaman olmuş olabilir, çünkü bildirisini yazmadan önce konuyu kavrayan bir tek oydu. Ama insanlar bildiriyi okuduklarında, birçok kişi görelilik kuramını şu ya da bu biçimde anladı ve bunların sayısı da kuşkusuz

12'den fazlaydı. Öte yandan, kuantum mekaniğini hiç kimsenin anlamadığını rahatlıkla söyleyebilirim, sanırım.

Feynman 30 yıl önce dile getirmiş olsa da, bugün de geçerliliğini aynı ölçüde koruyan bir görüştür bu. Feynman'ın demek istediği, özel ve genel görelilik kuramları dünyayı görme biçimimizde ciddi bir değişiklik gerektirse de, bu kuramların temelindeki ilkeler tam anlamıyla kabul edildiğinde, titiz bir akıl yürütmeyle, uzay ve zamana ilişkin yeni ve alışılmadık sonuçlara doğrudan ulaşılacağıydı. Önceki iki bölümde ele alınan, Einstein'ın çalışmasına ait betimlemeler üzerine yoğun bir şekilde düşünürseniz, vardığımız sonuçların kaçınılmaz olduğunu takdir edersiniz. Kuantum mekaniğinde durum farklıdır. 1920'lerin sonlarma gelindiğinde, kuantum mekaniğine ilişkin matematiksel formül ve kuralların birçoğu yerli yerine oturtulmuştu ve o yıllardan beri bu formül ve kuralların kullanımıyla bilim tarihindeki *en kesin* ve *başank* sayısal tahminlere ulaşılmıştır. Fakat, kuantum mekaniğini gerçek anlamda kullananlar, onun neden işe yaradığı ya da ne anlama geldiğini aslında pek de anlamadan, kuramın "kurucu babaları"nın koyduğu kural ve formülleri -basitçe gerçekleştirilen, hesaplamaya dayalı işlemler- izlerken bulmaktadır kendilerini. Görelilik kuramından farklı olarak, kuantum mekaniğini "derinlemesine" kavrayabilmiş insan sayısı yok denecek kadar azdır.

Peki ne yapacağız bu durumda? Bütün bunlar, evrenin mikro düzeyde son derece belirsiz ve alışılmadık biçimlerde işlediği, öyle ki çok uzun süre evrim geçirerek, gündelik ölçekte bildik olguların üstesinden gelen insan zihninin "aslında ne olup bittiği'ni bir türlü kavrayabilecek yeterlilikte olmadığı anlamına mı gelmektedir? Yoksa, fizikçiler tarihsel bir rastlantı sonucu kuantum mekaniğini son derece tuhaf bir biçimde, niceliksel olarak başarılı olsa da, gerçekliğin doğasıyla ilgili doğruların anlaşılmasını güçleştiren bir yolla formülleştirmiş olabilirler mi? Kimse bilmiyor. Belki ileride bir gün çok zeki biri çıkıp kuantum mekaniğinin "niçin"leri ve "ne"lerini tam anlamıyla ortaya koyan yeni bir formül bulacaktır. Bu, mümkün olmayabilir de. Kesin olarak bildiğimiz bir şey var ki, o da kuantum mekaniğinin, alışıldık dünyayı anlamamız için elzem birkaç temel kavramın, daha dikkatli bir şekilde mikrodünya üzerine

yoğunlaştığımızda *hiçbir anlam ifade etmiyor olduğunu* kesin ve tartışmasız bir şekilde gösteriyor olmasıdır. Sonuçta atomik ve atomaltı ölçeklerde evreni anlamaya ve açıklamaya girişirken, dilimizi de akıl yürütme biçimimizi de önemli ölçüde değiştirmemiz gerekiyor.

Bundan sonraki bölümlerde, bu dilin temellerini geliştirip beraberinde getirdiği birkaç sürprizi betimleyeceğiz. Bunu yaparken, kuantum mekaniği size büsbütün tuhaf, hatta deli saçması gibi gelirse, iki şeyi aklınızda tutmanız gerekir. Öncelikle, matematiksel olarak tutarlı bir kuram olmasının ötesinde, kuantum mekaniğine inanmamızın tek gerekçesi şaşırtıcı bir geçerlilikle doğrulanan tahminleri olanaklı kılmasıdır. Biri çıkıp da çocukluğunuzu en ince ayrıntısına dek satır satır anlatırsa, o kişinin uzun zamandır aradığınız kayıp kardeşiniz olduğu iddiasına inanmamanız elde değildir, ikinci olarak, kuantum mekaniğine karşı böyle bir tepkide bulunacak olsanız yalnız da kalmazsınız. Tüm zamanların en saygın fizikçilerinin bir kısmı da az ya da çok tepkinizi paylaşmaktadır. Einstein, kuantum mekaniğini bütünüyle kabul etmeye yanaşmamıştır. Elatta, kuantum kuramının başlıca öncülerinden ve en güçlü savunucularından olan Niels Bohr bile bir keresinde, kuantum mekaniğini düşündüğünüzde başınız dönüp mideniz bulanmıyorsa, onu gerçekten anlamış sayılamayacağınızı söylemiştir.

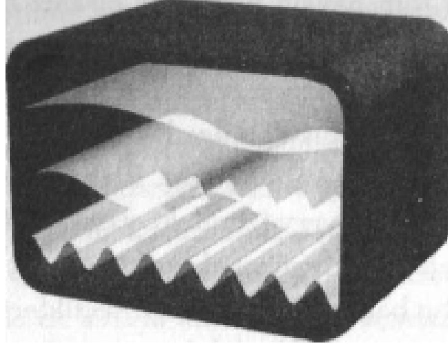
Mutfağın İçi Çok Sıcak

Fizikçileri kuantum mekaniğine götüren yolculuk bilmece gibi bir problemle başladı. Diyelim ki evdeki mükemmel bir yalıtıma sahip fırınınızı 200 santigrat dereceye ayarlıyorsunuz ve ısınması için yeterince zaman ayırıyorsunuz. Yakmadan önce, fırının içindeki tüm havayı boşaltmış olsanız bile, duvarlarını ısıtarak fırının iç kısmında ışınım dalgalan yaratırsınız. Bu, Güneş'in yüzeyinin ya da kızgın ocak demirinin yaydığı türde bir ışınım, yani elektromanyetik dalga biçimindeki ısı ve ışıktır.

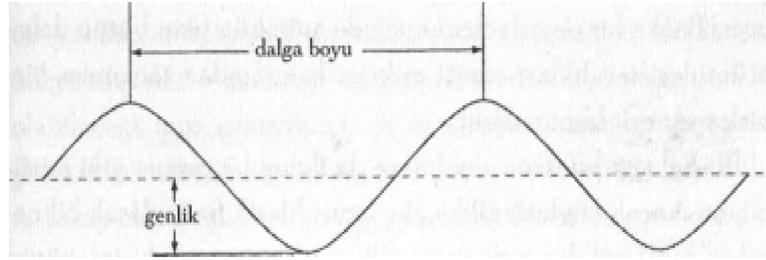
Problem işte burada yatmaktadır. Elektromanyetik dalgalar enerji taşır. Örneğin, yeryüzündeki yaşam Güneş'in elektromanyetik

dalgalarla Dünyaya aktardığı Güneş enerjisine bağlıdır. 20. yüzyılın başlarında fizikçiler, seçtikleri sıcaklığa ayarlanmış bir fırının içindeki elektromanyetik ışınımın taşıdığı toplam enerji miktarını hesapladılar. Yerleşik yöntemlerin kullanıldığı bu hesaplamada tuhaf bir cevaba ulaşıldı. Hangi sıcaklığa ayarlanmış olursa olsun, fırının içindeki toplam enerji sonsuzdur.

Bunun anlamsızlığı herkes için açıktı. Sıcak bir fırın önemli miktarda enerji içerebilir, ama kesinlikle sonsuz miktarda enerji içeremez. Planck'ın önerdiği çözümü kavrayabilmek için problemi biraz daha etraflıca anlama çabasına değer. Maxwell'in elektromanyetik kuramı bir fırının içindeki ışınıma uygulandığında, fırının içindeki sıcak duvarların ürettiği dalgaların, karşı yüzeylere kusursuz bir biçimde denk düşen *tam sayıda* tepeler ve çukurlara sahip olması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.1'de bazı örnekler görülüyor. Fizikçiler bu dalgaları tanımlarken üç terim kullanırlar: Dalga boyu, frekans ve genlik. *Dalga boyu.* Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, dalgalarda birbirini izleyen tepeler ya da birbirini izleyen çukurlar arasındaki mesafedir. Çukurlar ve tepelerin fazla sayıda olması, dalga boyunun kısa olması anlamına gelir; dalgalar fırının sabit duvarları arasına sıkışmıştır. *Frekans,* bir dalganın bir saniyede tamamladığı bir yukarı bir aşağı salınım döngülerinin sayısıdır. Frekansın dalga boyuyla, dalga boyunun da frekansla belirlendiği görülür: Dalga boyunun uzun olması frekansın düşük olması, kısa olması ise frekansın yüksek olması anlamına gelir. Bunun nedenini anlamak için, bir ucu bir yere bağlı uzun bir ipi sallayarak dalga yarattığınızda neler olduğunu düşünün. Uzun bir dalga boyu yaratmak için ipi gevşekçe bir aşağı bir yukarı sallarsınız. Dalgaların frekansı, kolunuzun bir saniyede ürettiği devir sayısına eşittir ve dolayısıyla hayli düşüktür. Ama kısa dalga boyu yaratmak için ipi daha bir şiddetli -yani daha fazla sıklıkla- sallarsınız, bu da daha yüksek frekans dalgası yaratır. Son olarak fizikçiler. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, bir dalganın maksimum yüksekliğini ya da derinliğini betimlemek için *genlik* terimini kullanırlar.



Şekil 4.1 MaxweII'in kuramı, bir fırının içindeki radyasyon dalgalarına ait tepe ve çukurların tam sayıya eşit olduğunu söyler; dalgalar tam dalga-devirleri gerçekleştirir.



Şekil 4.2 Dalga boyu, bir dalgada birbirini izleyen tepeler ya da çukurlar arasındaki mesafedir. Genlik ise dalganın maksimum yüksekliği ya da derinliğidir.

Elektromanyetik dalgalar biraz soyut bulunacak olursa, akılda tutulabilecek başka bir iyi benzetme bir keman telinin çekilmesiyle oluşan dalgalardır. Farklı dalga frekansları farklı notalara karşılık gelir: Frekans yükseldikçe nota dayükselir. Bir keman telindeki dalganın genliği teli ne kadar sert çektiğinize bağlıdır. Daha sert çekmeniz dalga etkisine daha fazla enerji yüklediğiniz anlamına gelir; dolayısıyla daha fazla enerji de daha fazla genliğe karşılık gelir. Sonuçta ortaya çıkan ton daha yüksek olacağı için bunu duyabilirsiniz. Benzer şekilde, daha az enerji daha az genliğe ve daha alçak sese karşılık gelir.

Fizikçiler 19. yüzyıl termodinamiğinin olanaklarıyla, fırının sıcak duvarlarının mümkün olan her dalga boyundaki elektromanyetik dalgalara ne kadar enerji aktaracağını, daha doğrusu duvarların her

dalgayı ne denli şiddetli "çekeceği"ni belirleyebilmişlerdi. Buldukları sonucu dile getirmek kolaydır: Mümkün olan dalgaların her biri -*dalga boyu ne olursa olsun-* aynı miktarda enerji (tam olarak fırının sıcaklığının belirlediği miktarda) taşır. Başka bir deyişle fırının içinde mümkün olan bütün dalga örüntüleri taşıdıkları enerji miktarı bakımından tamamen birbirleriyle eşit konumdadır.

İlk bakışta bu, fena sayılmasa da ilginç bir sonuç gibi görünüyor. Ancak böyle değildir. Bu sonuç klasik fizik olarak bilinegelen şeyin yıkılışı anlamına geliyor. Bunun sebebi ise bütün dalgalarda tepe ve çukurların tam sayıda olması gerekliliğidir. Bu koşul fırının içinde olası dalga örüntülerinin aşırı çeşitlilik göstermesini engellese de, bu koşula uyan olası dalgaları yine de sonsuz sayıda olacaktır ve bunların da tepe ve çukurları daha fazla sayıda olacaktır. Bütün dalga örüntüleri aynı miktarda enerji taşıdığından, sonsuz sayıda dalga, sonsuz miktarda enerji demektir. Sonuç olarak yüzyıl dönümünde kuramda çorbadaki sinek gibi keyif kaçırıcı bir durum vardı.

Yüzyıl Dönümünde Öbekler Oluşturmak

Planck 1900'de, bu muammayı çözmesini ve 1918'de fizik dalında Nobel Ödülü kazanmasını sağlayacak bir esinle bir tahminde bulundu. Bulduğu çözümle ilgili fikir edinebilmek için kocaman bir kalabalıkla -"sonsuz" sayıda insanla- birlikte, cimri bir ev sahibine ait geniş, soğuk bir depoya sıkış tepiş doluşturulduğunuzu ve orada yaşadığınızı hayal edin. Duvarda sıcaklığı kontrol eden şık bir dijital termostat var, ancak ev sahibinin ısınmanız için aldığı parayı duyunca dudaklarınız uçukluyor. Termostat 50 Fahrenhayt dereceye ayarlandığında, herkesin ev sahibine 50 dolar vermesi gerekiyor, 55 dereceye ayarlandığında ise 55 dolar vs. Depoyu sonsuz sayıda insanla paylaştığınızdan, termostat açılacak olursa ev sahibinin sonsuz miktarda para kazanacağını fark ediyorsunuz.

Ev sahibinin ödeme kurallarını ayrıntılı olarak incelediğinizde bir açığın olduğunu görüyorsunuz. Ev sahibi çok meşgul bir adam olduğundan, hele bir de söz konusu sonsuz sayıda kiracı olunca

para üstü vermekle uğraşmak istemiyor. Buyüzden çekle ödeme gibi farklı bir sistemle çalışıyor: Borçlarını tam olarak ödeyebilenler ödüyor. Diğerleri ise, sadece para üstü almaksızın ödeyebilecekleri kadarını ödüyor. Bu suretle, herkesin dahil olabileceği, ama ısınmak için fahiş ücretler ödenmesinin önüne geçecek bir çözüm arıyorsunuz ve depoyu paylaştığınız insanları, sahip olduğunuz zenginliği şu şekilde düzenlemeye ikna ediyorsunuz: Bir kişi bütün bir sentlikleri taşıyor, biri bütün beş sentlikleri, biri bütün on sentlikleri, biri bütün 25 sentlikleri, biri bütün bir dolarları, biri bütün beş dolarları, biri bütün on dolarları ve 20'likler, 50'likler, 100'lükler, 500'lükler derken, daha büyük ve bilinmedik banknotlara göre ayrışıyorsunuz. Yüzsüzlük bu ya, termostatı 80 dereceye ayarlayıp ev sahibinin gelmesini bekliyorsunuz. Ev sahibi geldiğinde, önce bir sentlikleri taşıyan gidip 8000 tane bir sent veriyor. Arkasından beş sentlikleri taşıyan gelip 1600 tane beş sent, sonra 10 sentlikleri taşıyan gelip 800 tane 10 sent, 25 sentlikleri taşıyan gelip 320 tane 25 sent veriyor. Sonra bir dolarlık banknotlar taşıyan kişi 80 tane, beş dolarlık banknotlar taşıyan 16 tane, 10 dolarlık banknotlar taşıyan 8 tane, 20 dolarlık banknotlar taşıyan *4* tane, 50 dolarlık banknotlar taşıyan bir tane veriyor (çünkü iki tane 50 dolarlık banknot gerekli tutarı aşıyor, ev sahibinin de para üstü vermesi gerekiyor). Fakat bunların dışında herkes, ödenmesi için gerekli tutarı aşan miktarda para taşıyor (minimum miktarda bir para "öbeği"). Onun için, bunlar ev sahibine ödemede bulunamıyor. Ev sahibi de beklediği gibi sonsuz miktarda para kazanacağına, 690 dolarlık bir meblağ ile oradan ayrılmak zorunda kalıyor.

Fırının içinde sonsuz miktarda enerji oluşacağına dair tuhaf sonucu sonlu bir miktara düşürmek için Planck da çok benzer bir strateji kullandı. Şimdi bunu nasıl yaptığını görelim. Planck, fırındaki elektromanyetik bir dalganın taşıdığı enerjinin, tıpkı örneğimizdeki para gibi öbekler halinde geldiği şeklinde genel bir tahminde bulundu. Enerji, temel bir "birim enerjinin bir katı olabilir, iki katı olabilir, üç katı vs. olabilir, ama hepsi budur. Bir sentin üçte biri ya da iki buçuk çeyreklik gibi bir para olamayacağı gibi, Planck da, iş enerjiye geldiğinde kesir küsurat olamayacağını söylüyordu. Bugün kullandığımız para birimleri ABD Hâzinesi tarafından belirleniyor.

Daha temel bir açıklama arayışına giren Planck, bir dalganın taşıdığı birim enerji miktarının -taşıyabileceği minimum enerji öbeğinin- o dalganın frekansı tarafından belirlendiğini ileri sürdü. Daha kesin bir deyişle, bir dalganın sahip olabileceği *minimum* enerji miktarının onun *frekansıyla doğru orantılı* olduğunu varsayıyordu: Daha yüksek frekans (daha kısa dalga boyu) daha fazla minimum enerji gerektirir; daha alçak frekans (daha uzun dalga boyu) daha az minimum enerjiyi gerektirir. Kabaca ifade edersek, tıpkı yumuşak okyanus dalgalarının uzun ve keyif verici, buna karşın sert olanların kısa ve çırpıntılı olması gibi, uzun dalga boylu ışınım özünde kısa dalga boylu ışınımdan daha az enerjiktir.

Gelelim can alıcı noktaya: Planck'ın hesapları, dalgaların her birinde mümkün olan enerji miktarının bu öbekliliğinin daha önceki, fırının içinde toplam sonsuz enerji şeklindeki tuhaf sonucu düzelttiğini gösteriyordu. Bunun sebebini anlamak zor değildir. 19. yüzyıl termodinamiğine dayalı hesaplamalar, bir fırın herhangi bir sıcaklığa ayarlandığında, her bir dalganın taşıdığı enerji miktarının toplama katkıda bulunacağı varsayımına dayanıyordu. Fakat, tıpkı ellerinde fazla para olan kiracıların ev sahibine borçlarını ödeyememesinde olduğu gibi, bir dalganın taşıyabileceği minimum enerji miktarı, katkıda bulunması gereken miktarı aşıyorsa, o dalga katkıda bulunamamakta, atıl kalmaktadır. Planck'a göre bir dalganın taşıyabileceği minimum enerji miktarı frekansıyla doğru orantılı olduğundan, fırında gördüğümüz yüksek frekanstaki dalgaların (daha kısa dalga boyundakiler) taşıyabileceği minimum enerji miktarı er geç katkıda bulunmaları beklenen enerji miktarından daha büyük *olur.* 50 dolarlıktan büyük banknotlar taşıyan kiracılar gibi, bu çok daha yüksek frekanslı dalgalar da 19. yüzyıl fiziğinin gerektirdiği enerji miktarına katkıda bulunamaz. Bu yüzden, tıpkı ısınma için yapılan ödemeye, sonlu miktarda toplam para sonucunu veren ancak sonlu sayıda kiracının katkıda bulunabilmesinde olduğu gibi, ancak sonlu sayıda dalga, fırının toplam enerjisine katkıda bulunabilir ve bu da yine enerji miktarının sonlu olmasına yol açar. İster enerji olsun ister para, temel birimlerin öbekliliği -ve daha yüksek frekanslar ya da daha büyük banknotlara çıktıkça bu

öbeklerin boyutlarının giderek büyümesi- sonsuz değeri gösteren bir cevabı sonlu olana çevirmektedir.

Planck, "sonsuz" enerji miktarını gösteren cevaptaki açık tuhaflıktan kurtularak önemli bir adım attı. İnsanları yaptığı tahminin geçerliliğine gerçekten inandıran şey ise, benimsediği yeni yaklaşımın, fırındaki enerji miktarının ne olacağı sorusuna getirdiği sonlu cevabın yapılan deneysel ölçümlerle çarpıcı bir biçimde uyuşmasıydı. Planck kesin biçimde, yeni hesaplarına dahil olan *bir* parametreyi değiştirerek, herhangi bir sıcaklığa ayarlanmış bir fırında ölçülen enerji miktarına dair doğru bir tahminde bulunabileceğini gördü. Bu tek parametre, bir dalganın frekansı ile taşıyabileceği minimum enerji öbeği arasındaki orantılılık faktörüydü. Planck bu orantıhlık faktörünün -bugün *Planck sabiti* olarak bilinir ve " H-bar" denir- gündelik birimlerin yaklaşık milyarda birinin milyarda birinin milyarda biri olduğunu buldu.Planck sabitinin böyle küçük bir değere sahip olması, enerji öbeklerinin boyutlarının genelde çok küçük olduğu anlamına gelmektedir. Örneğin bize, bir keman telindeki bir dalganın enerjisinde -dolayısıyla ürettiği ses yüksekliğinde- sürekli değişim yaratabilecekmişiz *gibi gelmesinin* sebebi budur. Bununla birlikte, Planck'a göre, dalganın enerjisi aslında farklı aşamalardan geçer, fakat bu aşamalar öyle küçük boyutlardadır ki, bir yükseklikten diğerine geçiş kolayca, hissedilmeden ger-çekleşiyormuş gibi görünür. Planck'ın iddiasına göre, bu enerji sıçramalarının boyutları, dalgaların frekansı yükseldikçe (dalga boyları kısaldıkça) büyür. Sonsuz-enerji paradoksunu çözen önemli bileşen, işte budur.

Göreceğimiz gibi, Planck'ın kuantum varsayımı bir fırının içindeki enerji miktarını kavramımızdan daha fazlasını olanaklı kılmaktadır. Dünyamızla ilgili apaçık olduğunu düşündüğümüz birçok şeyi alt üst etmektedir bu. H-bar'ın küçüklüğü, alışageldiğimiz yaşamdan radikal sapmaların birçoğunun mikrodün-yayla sınırlı kalmasına neden olur. Ancak, H-bar olduğundan daha büyük olsaydı, H-Bar'da yaşanan tuhaf olaylar aslında sıradan olaylar olurdu. Göreceğimiz gibi, bunlar mikrodünyada kesinlikle sıradan olaylardır.

Öbekler Nedir?

Enerjinin öbekliliği konusuna bu çok önemli girişi yaparken Planck, savını gerekçelendirecek bir dayanağa sahip değildi. Yaptığı hesapların işe yaramasının ötesinde ne kendisi ne de başka biri bunun niçin doğru olması gerektiğine dair ikna edici bir neden gösterebiliyordu. Fizikçi George Gamow'un dediği gibi, sanki doğa, birine ya bir büyük bardak biranın tamamını içeceksin ya da hiç içmeyeceksin diyor, ikisinin arasını kabul etmiyordu. 1905'te Einstein bir açıklama buldu ve bu keskin gözlemi ona 1921'de Fizik Nobeli'ni getirdi.

Einstein, açıklamasına fotoelektrik etkisi olarak bilinen şey üzerine kafa yorarak ulaştı. Alman fizikçi Eleinrich Elertz 1887'de, elektromanyetik ışınımın -ışığın- belirli metaller üzerinde parladığında, bunların elektron saldığını bulan ilk kişi oldu. Bu, tek başına dikkat çekici bir buluş değildi. Metallar, atomlarının içindeki bazı elektronların gevşek bir şekilde bağlı olması gibi bir özelliğe sahiptir (elektriği bu kadar iyi iletmelerinin nedeni de budur). Işık metal yüzeye vurduğunda enerjisini bırakır; tıpkı teninize vururken ısındığınızı hissetmenizde olduğu gibi. Bu aktarılmış enerji metalin elektronlarını harekete geçirebilir ve gevşek tutunan elektronların bir kısmı yüzeye çıkabilir.

Fakat fotoelektrik etkinin tuhaf özellikleri, dışarı çıkan bu elektronların doğası daha ayrıntılı incelendiğinde belirginlik kazanır. İlk bakışta, ışığın yoğunluğu -parlaklığı- arttıkça, etkide bulunan elektromanyetik dalganın daha fazla enerjisi olduğundan, metalden çıkan elektronların hızının da artacağını düşünebilirsiniz. Ancak bu *gerçekleşmez.* Metalden çıkan elektronların *sayısı* artarken hızları sabit kalır. Öte yandan, metale vuran ışığın *frekansı* yükseldiğinde, metalden çıkan elektronların hızının *arttığı,* benzer şekilde frekans düştüğünde, elektronların hızının da düştüğü deneysel olarak gözlenmiştir. (Tayfın görülebilir kısmındaki elektromanyetik dalgalar açısından, frekansta bir yükselme, rengin kırmızıdan turuncuya, sonra sarıya, yeşile, maviye, çivite ve nihayet leylak rengine dönmesine denk düşer. Leylak rengininkinden daha yüksek frekanslar görünebilir değildir ve ultraviyole, sonra da X ışınlarına karşılık gelirler; kırmızıdan düşük frekanslar da görünebilir değildir ve

kızılötesi ışınıma karşılık gelirler.) Aslında, kullanılan ışığın frekansı düşürüldükçe metalden çıkan elektronların hızının sıfıra düştüğü ve *ışık kaynağının olası bir kör edici yoğunlukta olup olmadığına bakılmaksızın,* yüzeyden dışarıya atılmalarının kesildiği bir noktaya gelinir. Bilinmeyen bir nedenle metalden elektronların çıkıp çıkmayacağını, çıkarlarsa sahip olacakları enerji miktarını metale vuran ışık demetinin rengi -ama toplam enerjisi değil- belirler.

Einstein'ın bu kafa karıştırıcı olgulara getirdiği açıklamayı anlayabilmek için, 80 Fahrenhayt derecede ısıtılmakta olan depoya geri dönelim şimdi. Düşünün ki çocuklardan nefret eden ev sahibi, 15 yaşından küçük herkesin deponun altındaki bodrum katında yaşamasını şart koşuyor ve yetişkinler, çocukları bodrum katını çevreleyen kocaman bir balkondan izleyebiliyor. Dahası da var: Bodrum katına mahküm çocuklar ancak kapıdaki bekçiye 85 sent çıkış ücreti ödendiğinde depodan çıkabiliyorlar. (Ev sahibinin çocuk yiyen bir canavardan farkı yok.) Israrınız üzerine kolektif zenginliği para birimlerine göre düzenleyen yetişkinler çocuklara sadece balkondan atarak para verebiliyorlar. Bakalım neler oluyor.

Bir sentlikleri taşıyan kişi, birkaç tane atıyor aşağıya ama bu, çocuklardan birinin bile çıkış parası için yetmeyecek kadar küçük bir meblağ. Esasında, aşağıda düşen paraları yakalamak için azgın dalgalar halinde kaynaşan "sonsuz" bir çocuk denizi olduğundan, bir sendikleri taşıyan yetişkin aşağıya muazzam miktarda para atsa bile, tek bir çocuk dahi çıkmak için bekçiye ödemesi gereken 85 senti toplayamayacaktır. Aynı durum, beş sentlik, 10 sentlik, 25 sentlik taşıyan yetişkinler için de geçerli. Aşağıya herkes tarafından inanılmaz miktarda para atılmasına rağmen, bir tane bile yakalayan çocuklar şanslıdır (çoğu hiçbir şey yakalayamaz); çıkış için gerekli 85 senti toplayan çocuk çıkmıyor. Ancak sonra, dolar taşıyan yetişkin aşağıya nisbeten az, tek tek bile olsa para atmaya başladığında tek bir banknot bile yakalayan şanslı çocuklar, derhal oradan çıkabiliyorlar. Fakat dikkat edin, bir dolarlık banknot taşıyan yetişkin, aşağıya variller dolusu bir dolarlık banknot atsa da, depodan çıkabilen çocukların sayısında muazzam bir artış olmakta, ancak hepsinin de cebinde bekçiye yaptıkları ödemeden sonra 15 sent

kalmaktadır. Aşağıya atılan banknotların sayısı ne olursa olsun, bu geçerlidir.

Şimdi tüm bunların fotoelektrik etkiyle ilişkisine bakalım. Einstein yukarıda gördüğümüz deneysel verilere dayanarak, dalgaların taşıdığı enerji öbekliliğiyle ilgili Planck'ın çizdiği tabloyu ışığın yeni bir tanımıyla birleştirmeyi önerdi. Einstein'a göre bir ışık demeti, aslında, kimyacı Gilbert Lewis'in sonunda ***fo****ton* adını vereceği *küçük paketlerden -küçük ışık parçacıklarından- oluşan bırakım* olarak düşünülmelidir. İL Bölüm'deki ışık saati örneğinde kullandığımız bir fikirdir bu). Işığı parçacıklar üzerinden gören bu bakış açısında, ölçeklerle ilgili örnek sunmak için, bildiğimiz 100 vatlık bir ampulün saniyede 10" foton salmasını verebiliriz. Einstein bu yeni kavrayışa dayanarak fotoelektrik etkinin temelindeki mikro mekanizmaya dair bir varsayımda bulundu: Bir elektrona yeterince enerji yüklü bir foton çarptığında, elektronun metalin yüzeyine çıkacağını ileri sürdü. Peki fotonun enerjisini belirleyen nedir? Einstein deneysel verileri açıklarken, Planck'ın izinden giderek, *her bir* fotonun enerjisinin ışık dalgasının frekansıyla (Planck sabiti olarak orantılı-lık faktörüyle) doğru orantılı olduğunu ileri sürdü.

Bu durumda, tıpkı, çocukların ödemesi gereken minimum çıkış ücreti gibi, bir metaldeki elektronların dayüzeye çıkarılabil-meleri için belli bir minimum enerjiye sahip fotonlarla çarpışmaları gerekir. (Tıpkı çocukların aşağıya atılan paraları yakalamak için birbirleriyle itişip kakışmalarında olduğu gibi, bir elektronun birden fazla fotonla çarpışma olasılığı son derece düşüktür; çoğu hiç çarpışmaz.) Fakat metale vuran ışık demetinin frekansı çok düşükse, demetteki fotonlar da elektron çıkarmak için gerekli kuvvetten yoksun olacaktır. Yetişkinler aşağıya muazzam sayıda para attığı halde çocukların çıkmak için gerekli meblağı toplayamamasında olduğu gibi, metale vuran ışık demetinin toplam enerjisi ne olursa olsun, frekansı (dolayısıyla tek tek fotonlardaki enerji miktarı) çok düşükse, fotonlarla çarpışıp serbest kalabilen elektron olmayacaktır.

Fakat, bodrum katına atılan paralar birimsel olarak yeterli büyüklükte olunca, çocukların depodan ayrılma olanağına hemen

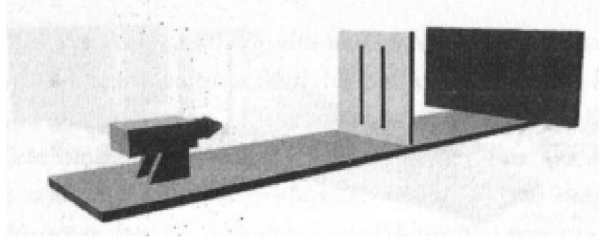
kavuşmasında olduğu gibi, metale vuran ışığın frekansı -enerji birimi- yeterince yükselir yükselmez elektronlar da yüzeye çıkmaya başlayacaktır. Dahası, bir dolarlık banknotlara sahip yetişkinin aşağıya attığı banknot sayısını artırarak, attığı toplam meblağı yükseltmesinde olduğu gibi, belli bir frekanstaki ışık demetinin toplam yoğunluğu da, içerdiği foton sayısının artırılmasıyla artacaktır. Tıpkı dolar sayısının artmasının, daha fazla sayıda çocuğun depodan ayrılmasını olanaklı kılmasında olduğu gibi, foton sayısının artması da daha fazla sayıda elektronun çarpılıp yüzeye çıkmasını sağlamaktadır. Dikkat edilmesi gereken nokta, yüzeye çıkmaları sonrasında bu elektronların her birinde kalan enerji miktarının, sadece ve sadece onlara çarpan fotonlar m her birindeki enerji miktarına bağlı olmasıdır; bunu da ışık demetinin toplam yoğunluğu değil, frekansı belirler. Tıpkı aşağıya kaç tane bir dolarlık banknot atılmış olursa olsun, her bir çocuğun bodrum katının kapısından cebinde 15 sentle çıkmasında olduğu gibi, metale vuran ışığın toplam yoğunluğu ne olursa olsun, her elektron da yüzeyi aynı miktarda enerjiyle -dolayısıyla aynı hızla- terk eder. Aşağıya atılan toplam para sayısının daha fazla olması, daha fazla sayıda çocuğun bodrum katını terk edebilmesi anlamına gelir; ışık demetinin toplam enerji miktarının daha fazla olması da, daha fazla elektronun fotonlarla çarpışıp serbest kalması anlamına gelir. Çocuklar kapıdan çıkarken ceplerinde daha fazla para kalsın istersek, aşağıya atılan paraların birim değerini yükseltmemiz gerekir; yüzeye çıkan elektronların daha hızlı olmasını istersek metale vuran ışık demetinin frekansını yükseltmemiz, yani metalik yüzeye gönderdiğimiz fotonların taşıdığı birim enerji miktarını artırmamız gerekir.

Bu açıklama, deneysel verilerle tamamen uyumludur. Işığın frekansı (rengi) metalden çıkan elektronların hızını belirler; ışığın toplam yoğunluğu ise çıkan elektronların sayısını belirler. Einstein böylece, Planck'ın enerji öbekleriyle ilgili tahmininin aslında elektromanyetik dalgaların temel bir özelliğini yansıttığını gösteriyordu: Elektromanyetik dalgalar küçük ışık paketleri ya da *kuantalardan* ibaret parçacıklardan -fotonlardan- oluşmaktadır. Bu dalgaların taşıdığı enerjinin kesikliliği, öbeklerden oluşmalarından kaynaklanır.

Einstein'ın bu görüşü büyük bir ilerlemeyi temsil ediyordu. Fakat göreceğimiz gibi, konu göründüğü kadar derli toplu değildir.

Dalga mı yoksa Parçacık mı?

Suyun ve tabi su dalgalarının çok sayıda su molekülünden oluştuğunu herkes bilir. Dolayısıyla, ışık dalgalarının aynı zamanda çok sayıda parçacıktan, yani fotondan oluşması gerçekten şaşırtıcı mıdır? Öyledir. Ancak, şaşırtıcı olan şey ayrıntılarda gizlidir. Üç yüzyılı aşkın bir süre önce Newton, ışığın parçacık akımlarından oluştuğunu ileri sürdüğü için fikir yeni değildir. Gelgelelim, Newton'un bazı meslektaşları, özellikle Hollandalı fizikçi Christian Huygens bu fikri paylaşmıyor, ışığın birdalga olduğunu savunuyordu. Tartışma giderek kızıştı, fakat sonunda, İngiliz fizikçi Thomas Young tarafından 1800'lerin başında gerçekleştirilen deneyler Newton'un yanıldığım gösterdi.

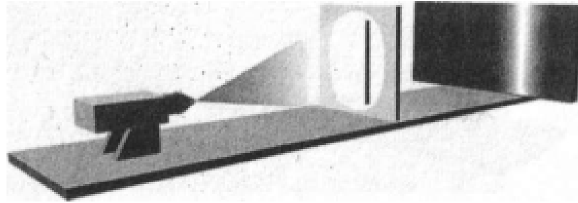


Şekil 4.3 Young deneyinde, üzerine iki delik açılmış bir levhaya ışık demeti tutulur. Deliklerden biri ya da ber ikisi açık olduğunda levhadan geçen ışık bir fotoğraf levhasına kaydedilir.

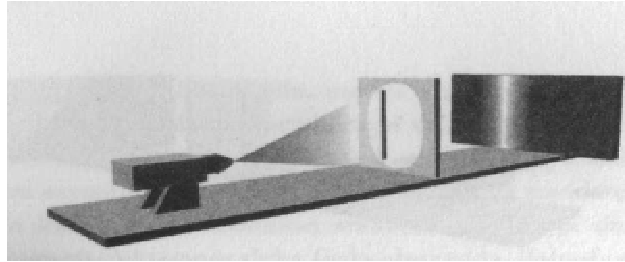
Young'ın deneysel düzeneği -bu deney Young deneyi olarak da bilinir- Şekil 4.3'te şematik olarak gösterilmiştir. Feynman, bu biricik deneyin çıkarımlarından, dikkatli bir şekilde irdelemeyle bütün bir kuantum mekaniğini süzüp çıkarmanın olanaklı olduğunu söylemekten pek hoşlanırdı, bu yüzden üzerinde durmaya değer bir deneydir. Şekil 4.3'te gördüğümüz gibi üzerine iki delik açılmış ince bir levhaya ışık tutulmuştur. Bir fotoğraf levhası, deliklerden geçen ışığı kaydeder; fotoğrafın parlak kısımları gelen ışığın daha fazla olduğu yerleri göstermektedir. Deney, deliklerden biri ya da ikisi birden açık bırakıldığında ve ışık kaynağı açıldığında fotoğraf

levhaları üzerinde oluşan görüntülerin karşılaştırılmasından oluşmaktadır.

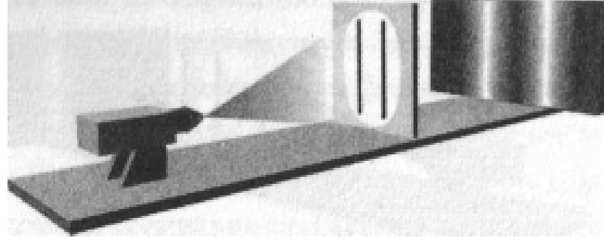
Sol delik kapatılıp sağ delik açık bırakıldığında, fotoğraf Şekil 4.4'teki gibi görünecektir. Bu gayet anlamlıdır, çünkü fotoğraf levhasına düşen ışık açık olan tek delikten geçecektir, dolayısıyla fotoğrafın sağ kısmında yoğunlaşacaktır. Benzer şekilde sağ delik kapatılıp sol delik açık bırakıldığında, fotoğraf Şekil 4.5'teki gibi görünecektir. Her iki delik açık olduğunda, Newton'un parçacıklardan oluşan ışık tanımı, fotoğraf levhasının Şekil 4.6'daki gibi görüneceği. Şekil 4.4 ile Şekil 4.5'in bir karışımı olacağı tahminine götürmektedir. Newton'un ışık parçacıklarını duvara ateşlediğiniz çok minik gülleler olarak düşünürseniz, levhayı aşan parçacıkların iki deliğin karşısına denk düşen bölgelerde yoğunlaşacağını söyleyebilirsiniz. Dalgalardan oluşan ışık tanımı ise, iki delik birden açık bırakıldığında neler olacağına dair çok farklı bir tahmine götürmektedir. Şimdi buna bakalım.



Şekil 4.4 Sağ deliğin açık olduğu bu deneyde, fotoğraf levhası üzerinde görülen görüntü ortaya çıkmaktadır.



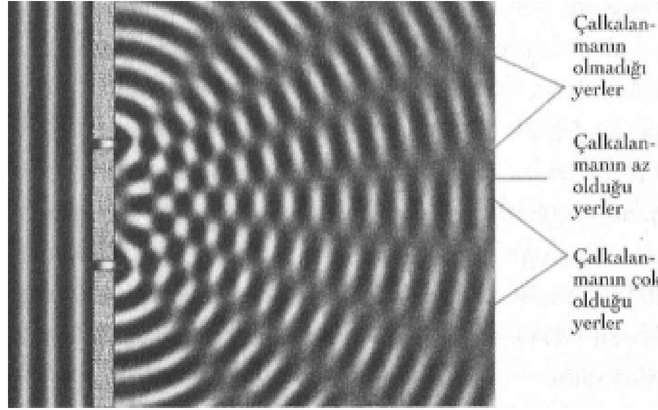
Şekil 4.5 Şekil 4.4'te olduğu gibi, fakat bu kez yalnızca sol delik açık.



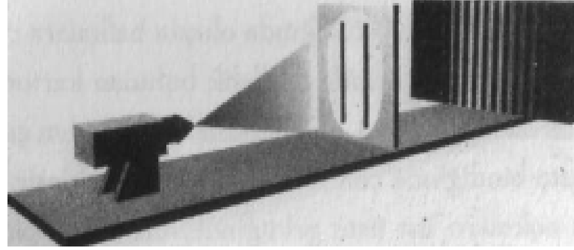
Şekil 4.6 Newton'un parçacıklara dayalı ışık görüşü, iki delik de açık bırakıldığında, fotoğraf levhasındaki görüntünün Şekil 4.4 ile 4.5'teki görüntülerin bir birleşimi olacağı tahmininde bulunur.

Işık dalgaları yerine su dalgaları kullandığımızı düşünelim. Bulacağımız sonuç aynıdır, ancak su üzerine düşünmek daha kolaydır. Su dalgaları levhaya çarptığında, deliklerin her birinden çıkan dairesel su dalgaları oluşur ve Şekil 4.7'de görüldüğügibi bunlar, bir göle taş atıldığında oluşan halkalara çok benzer. (Su dolu bir kapta üzerinde iki delik bulunan karton bir levha ile kolayca denenebilir bu.) Deliklerin her birinden çıkan dalgalar üst üste bindiğinde çok ilginç bir şey gerçekleşir, iki dalganın tepe noktaları üst üste geldiğinde, bu noktadaki dalganın yüksekliği artar, ayrı iki dalganın yüksekliklerinin toplamı olur. İki dalganın çukur noktaları üst üste bindiğinde, o noktadaki yüzey girintisinin derinliği de artar. Son olarak, bir delikten çıkan dalganın tepe noktası, diğer delikten çıkan dalganın çukur noktasıyla üst üste binerse, birbirlerini iptal ederler. (Aslma bakılırsa, ses geçirmez kulaklıkların ardında yatan fikir de budur; gelen ses dalgasının şeklini ölçerek tam "zıt" başka bir ses dalgası oluştururlar ve böylece istenmeyen sesler engellenmiş olur.) Uçlardaki bu üst üste binmeler -tepe noktaları tepe noktalarıyla, çukur noktaları çukur noktalarıyla ve tepe noktaları çukur noktalarıyla- dışında birçok kısmi yükseklik artışları ve iptaller söz konusudur. Diyelim ki, siz ve bir grup arkadaşınız, levhaya paralel küçük teknelerden bir hat oluşturuyorsunuz ve her biriniz deliklerden geçen su dalgasıyla ne kadar sallandığınızı söylüyorsunuz. Ortaya çıkan sonuç. Şekil 4.7'nin en sağında görünen şekil gibi olacaktır. Çalkalanmanın çok olduğu yerler, deliklerin her birinden çıkan dalga tepe noktalarının (ya da çukur noktalarının) kesiştiği bölgelerdir. Çalkalanmanın az olduğu ya da hiç olmadığı bölgeler ise, bir delikten

çıkan dalga tepe noktalarının diğer delikten çıkan çukur noktalarıyla kesiştiği, böylece birbirlerini iptal ettikleri yerlerdir.



Şekil 4.7 Deliklerin her birinden çıkan dairesel su dalgaları üst üste biner, bu da toplam dalganın bazı yerlerde büyümesine bazı yerlerde küçülmesine yol açar.



Şekil 4.8 Işık bir dalga ise, iki delik açık olduğunda, dalgaların her birinden çıkan dalga kısımları arasında girişim olacaktır.

Fotoğraf levhası gelen ışıkla ne ölçüde "çalkalanma" olduğunu gösterdiğinden, bir ışık demetinin dalga resmi üzerine aynı akıl yürütmeyle iki delik de açık bırakıldığında fotoğrafın Şekil 4.8'deki gibi görüleceği sonucuna ulaşılır. Şekil 4.8'deki en parlak bölgeler, deliklerin her birinden çıkan ışık dalgalarının tepe noktalarının (ya da çukur noktalarının) kesiştiği yerlerdir. Karanlık bölgeler ise bir delikten çıkan tepelerin, diğerinden çıkan çukur noktalarıyla kesiştiği, böylece birbirlerini iptal ettikleri yerlerdir. Şeritlerin düzeni, *girişim örimtüsü* olarak bilinir. Bu fotoğraf. Şekil 4.6'da gösterilenden önemli ölçüde farklıdır, bu yüzden ışığın parçacıklı ve dalgalı betimleri arasındaki farkı ayırt etmek için somut bir deney söz konusudur.

Young bu deneyin değişik bir biçimini gerçekleştirdi. Bulduğu sonuçlar Şekil 4.8'dekine uyuyor, böylece ışığın dalgalardan oluştuğu görüşünü doğruluyordu. Böylelikle Newton'un ışığın parçacıklardan oluştuğu görüşü yenilgiye uğradı (gerçi fizikçilerin bunu kabul etmesi bir hayli zaman almıştır). Galip gelen ışığın dalga kuramı daha sonra Maxwell tarafından matematiksel temellere oturtuldu.

Ancak, Newton'un saygın kütleçekimi kuramını yerle bir eden Einstein, fotonları devreye sokarak Newton'un parçacıklı ışık modelini şimdi yeniden diriltmiş görünmektedir. Hiç şüphesiz, hâlâ aynı soruyla karşı karşıyayız: Parçacıklara dayalı bir bakış açısı, Şekil 4.8'deki girişim örüntüsünü nasıl açıklayabilir? İlk bakışta şöyle bir tahminde bulunabilirsiniz: Su, H_2O moleküllerinden, yani su parçacıklarından oluşur. Bununla birlikte, bu moleküllerden çok çok fazlası birbiri ardı sıra aktığında, su dalgaları oluşturabilirler; bu dalgalara da Şekil 4.7'de gördüğümüz girişim özellikleri eşlik eder. Böylece, çok fazla sayıda fotonun, yani ışık parçacığının söz konusu olması koşuluyla, girişim desenleri gibi dalga özelliklerinin parçacıklı ışık betiminden doğacağını tahmin etmek akla yatkın gelebilir.

Oysa aslında, mikrodünya kolayca fark edilemeyen ve anlaşılması zor özelliklere sahiptir. Şekil 4.8'de görülen ışık kaynağının yoğunluğu iyice ve hatta sonunda fotonların levhaya *tek tek* gönderildiği -diyelim ki her 10 saniyede bir fotonun gönderildiği- bir noktaya kadar azaltılsa bile, sonuçta ortaya çıkan fotoğraf levhası hâlâ Şekil 4.8'deki gibi görünecektir: Bu ışık demetlerinin, deliklerden ayrı ayrı geçmesini, her birinin fotoğraf levhasında vurduğu yerin tek bir noktayla kaydedilmesini, böyle çok sayıda ışık demetinin aynı işlemi tekrarlamasını yeterince süre beklediğimizde, levhanın üzerindeki bu noktalar, Şekil 4.8'de görülen bir girişim örüntüsünün görüntüsünü oluşturacaktır. Şaşırtıcıdır bu. Aradaki levhadan sırayla *tek tek* geçip fotoğraf levhasına vuran foton parçacıkları, nasıl olur da bir araya gelip girişen dalgaların karanlık ve parlak şeritlerini oluşturur? Geleneksel akıl yürütme bize her bir fotonun ya sol delikten ya sağ delikten geçeceğini, bu nedenle Şekil 4.6'da görülen

şekli karşımızda bulmayı beklememiz gerektiğini söyler. Ama karşımıza bu çıkmaz.

Doğanın bu olgusu kafanızı allak bullak etmediyse, ya daha önce görmüş ve artık kanıksamışsınızdır bunu ya da buraya kadar yaptığımız betimleme yeterince canlı değildir. İkincisinin söz konusu olma olasılığını göz önünde bulundurarak, betimlemeye tekrar girişelim; ama bu kez biraz farklı bir biçimde. Sol deliği kapatıyoruz ve fotonları tek tek levhaya gönderiyoruz. Fotonla-rın bir kısmı levhadan geçiyor, bir kısmı ise geçemiyor. Levhadan geçenler fotoğraf levhasının üzerinde, Şekil 4.4'te nokta nokta görünen görüntüyü oluşturuyor. Sonra deneyi yeni bir fotoğraf levhasıyla tekrarlıyoruz, ama bu kez deliklerin ikisini de açık bırakıyoruz. Bu durumda doğal olarak, bunun sadece levhadaki deliklerden geçip fotoğraf levhasına vuran foton sayısının artmasını sağlayacağını, böylece levhanın ilk deneyde olduğundan daha fazla toplam ışığa maruz kalacağını düşünürüz. Fakat ortaya çıkan görüntüyü incelediğimizde, beklediğimiz gibi fotoğraflev-hasının üzerinde ilk deneyde karanlık kalıp da şimdi parlak olan yerlerden başka, tıpkı Şekil 4.8'de olduğu gibi ilk deneyde parlak olup şimdi karanlık olan yerler de olduğunu görürüz. Fotoğraf levhasına vuran tek tek fotonların sayısını *artırarak* belli bölgelerdeki parlaklığı *azaltmış* oluyoruz. Geçici olarak birbirlerinden ayrılan fotonlar, bir şekilde birbirlerini iptal etme yeteneğin-dedirler. Bunun ne kadar çılgınca bir şey olduğunu düşünün bir: Sağ delikten geçip Şekil 4.8'deki karanlık şeritlerden birine vurabilecek fotonlar, *sol* delik açıldığında bunu yapamamaktadır (şeritin şimdi karanlık olmasının sebebi budur). Peki nasıl oluyor da, bir delikten geçebilen küçücük bir ışık demeti diğer deliğin açık olup olmamasından etkilenebiliyor? Feynman'ın işaret ettiği gibi, garip bir şekilde, sanki levhaya makineli tüfekle ateş açıyoruz; levhadaki iki delik de açık olduğunda bağımsız, ayrı ayrı ateşlenmiş mermiler bir şekilde birbirlerini iptal ediyor ve hedefte hiç dokunulmamış, levhada sadece tek delik açık olduğunda *vurulan* bölgelerden oluşan bir desen bırakıyorlar.

Bu tür deneyler Einstein'ın ışık parçacıklarının Newton'un-kilerden hayli farklı olduğunu göstermektedir. Fotonlar parçacık olsalar da, bir

şekilde ışığın dalgaya benzer özelliklerini taşımaktadır aynı zamanda. Bu parçacıkların enerjisinin dalgaya benzer bir özellik -frekans- tarafından belirlenmesi, tuhaf bir birleşmenin ortaya çıktığına dair ilk işarettir. Fakat fotoelektrik etkisi ile Young deneyi, dersi anlamamızı kolaylaştırıyor. Fotoelektrik etkisi ışığın parçacık özelliklerine sahip olduğunu gösteriyor; Young deneyi, ışığın dalgaların girişim özelliklerini ortaya koyduğunu gösteriyor. İkisi birlikte ise ışığın *hem dalgaya hem parçacığa benzer özellikler* taşıdığını gösteriyor. Mikro-dünya bir şeyin ya dalga ya parçacık olduğunu söyleyen sezgimizi bir kenara bırakmamızı, o şeyin hem dalga hem parçacık olma olasılığını kucaklamamızı söylüyor. Feynman'ın, "Kuantum mekaniğini kimse anlamıyor," iddiası da işte burada öne çıkıyor. "Dalga-parçacık ikiliği" gibi ifadeleri dile getirmek mümkündür. Bu sözleri, gerçek deneyleri inanılmaz bir geçerlilikle betimleyen matematiksel formelliğe aktarabiliriz. Fakat mikro-dünyanın bu şaşırtıcı özelliğini derin, sezgisel bir düzeyde anlamak son derece zordur.

Madde Parçacıkları da Dalgadır

20. yüzyılın ilk yıllarında birçok büyük kuramsal fizikçi, gerçekliğin o zamana dek gizli kalmış bu mikro yönleri üstüne matematiksel olarak sağlam, fiziksel açıdan anlamlı bir kavrayış geliştirmek için yorulmak nedir bilmeden uğraşıp durdular. Örneğin Kopenhag'da Niels Bohr'un öncülüğünde, kor halindeki hidrojen atomlarının saçtığı ışığın özelliklerini açıklama konusunda ciddi ilerleme kaydedildi. Fakat bu ve 1920'lerin ortalarından önce yapılmış diğer çalışmalar, fiziksel evreni anlamaya yönelik tutarlı bir çerçeveden çok 19. yüzyılın fikirleri ile yeni bulunmuş kuantum kavramlarının derme çatma bir biçimde bir araya getirilmesiydi. Newton'un hareket yasalarının ya da Maxwell'in elektromanyetik kuramının açık ve mantıklı çerçevesiyle karşılaştırıldığında, kısmen geliştirilmiş kuantum kuramı karmakarışık bir haldeydi.

1923'te genç Fransız soylusu Prens Louis de Broglie kuantum tartışmasına yeni bir öğe ekledi; modern kuantum mekaniğinin matematiksel çerçevesinin kurulmasına katkıda bulunacak, de

Broglie'ye de 1929'da fizik alanında Nobel Ödülü kazandıracak bir öğeydi bu. De Broglie, Einstein'ın özel görelilik kuramına tutunan bir akıl yürütmeden esinlenerek dalga-parçacık ikiliğinin yalnızca ışık değil, madde için de geçerli olduğunu ileri sürdü. De Broglie, kabaca ifade etmek gerekirse, Einstein'ın $E=mc^2$ formülünün kütleyi enerjiyle ilişkilendirdiğini, Planck ile Einstein'ın enerjiyi dalga frekanslarıyla ilişkilendirdiğini, bu yüzden bu iki ilişkilendirme birleştirildiğinde, kütlenin de dalgaya benzer bir somutluğu olması gerektiğini düşünüyordu. De Broglie, bu mantık çizgisinde titizlikle çalıştıktan sonra, tıpkı kuantum kuramının ışığın eşit derecede geçerli parçacık tanımına sahip, dalgayla ilgili bir formül olduğunu gösterdiği gibi, normalde parçacık olarak düşündüğmüz elektronun da, dalga özelliğiyle aynı ölçüde geçerli bir tanıma sahip olabileceğini öne sürdü. Einstein, görelilik ve fotonlar konusundaki katkılarının doğal bir uzantısı olduğu için, de Broglie'nin fikrini hemen benimsedi. Yine de, deneysel kanıtların yerini hiçbir şey tutamaz. Bu kanıtlar çok geçmeden Clinton Davisson ile Lester Germer'in çalışmalarında ortaya konacaktı.

1920'lerin ortalarında, Bell telefon şirketinde deneysel fizikçi olarak görevyapan Davisson ve Germer, bir elektron demetinin bir nikel parçasına nasıl çarptığı üzerinde çalışıyorlardı. Burada bizim için önemli tek ayrıntı, böyle bir deneyde kullanılan nikel kristallerinin daha önce şekillerle gösterilen deneydeki iki delik gibi davranıyor olmasıdır. Aslına bakılırsa, bunun orada anlatılan deneyin aynısı olduğunu düşünmenin hiçbir sakıncası yoktur; yalnız, bu deneyde ışık demeti yerine elektron demeti kullanılmaktadır. Biz, bu bakış açısını benimseyeceğiz. Davisson ve Germer, elektronların levhadaki iki delikten geçip, her bir elektronun etkilediği yeri parlak bir nokta olarak kaydeden fosforlu bir ekrana vurmasını -aslında bir televizyonun içinde olan da budur- incelerken dikkat çekici bir şey keşfettiler. Ortaya Şekil 4.8'dekine çok benzer bir desen çıktı. Bu yüzden, yaptıkları deneyler elektronların girişim olgusunu, yani *dalga* niteliklerini açığa vuran işaretleri gösteriyordu. Fosforlu ekran üzerindeki karanlık bölgelerde, tıpkı su dalgalarının tepe ve çukur noktalarının üst üste binmesinde olduğu gibi, elektronlar bir şekilde "birbirlerini iptal ediyordu." Gönderilen elektron demeti, örneğin her

10 saniyede tek bir elektronun gönderileceği kadar "inceltilse" dahi, tek tek elektronlar o parlak ve karanlık şeritleri yine de oluşturuyordu; her bir seferde tek nokta oluşuyordu. Bir şekilde, tıpkı fotonların durumunda söz konusu olduğu gibi, tek tek elektronlar birbirleriyle "girişiyor", zaman içinde dalgalarla ilişkilendirilen girişim örüntüsünü yeniden inşa ediyordu. Bu noktada kaçınılmaz olarak, her bir elektronun, o bildiğimiz parçacık tanımıyla birlikte dalgaya benzer bir nitelik taşıdığı sonucuna varmak zorunda kalıyoruz.

Ektronlar açısından bunu tanımlamış olsak da, benzer deneyler, *bütün* maddelerin dalgaya benzer bir nitelik taşıdığı sonucunu doğurmaktadır. Fakat bu sonuç, katı ve sağlam, hiçbir biçimde dalgaya benzemez madde olarak gerçek dünya deneyimimizle nasıl uyuşmaktadır? De Broglie, madde dalgalarının dalga boyu için bir formül kaleme aldı; bu, dalga boyunun Planck'ın H-bar sabitiyle doğru orantılı olduğunu gösteriyordu. (Daha doğrusu, H-barın verdiği dalga boyu, maddi cismin momentumuna bölünüyordu.) H-bar çok küçük olduğundan, sonuçta ortaya çıkan dalga boylan da gündelik ölçeklerle karşılaştırıldığında benzer şekilde küçüktü. Maddenin dalgaya benzer niteliğinin ancak titiz mikroskobik incelemelerle netlik kazanmasının sebebi işte budur. Nasıl ki, c'nin, yani ışık hızının çok büyük değere sahip olması, uzay ve zamanın gerçek doğasının anlaşılmasını güçleştiriyorsa, H-bar'ın küçük olması da maddenin dalgaya benzer özelliklerinin gündelik yaşamda anlaşılmasını güçleştirmektedir.

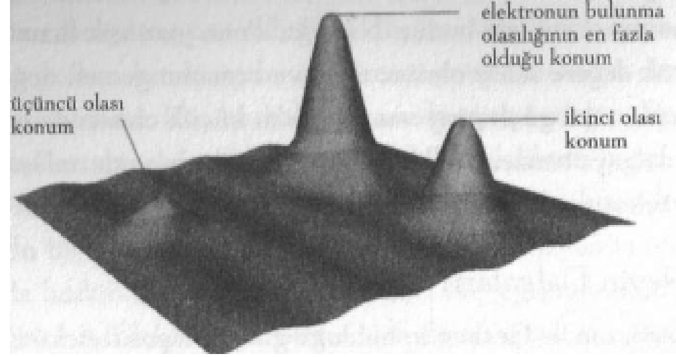
Neyin Dalgaları?

Davisson ile Germer'in bulduğu girişim olgusu, elektronların dalgaya benzer niteliğini elle tutulur hale getirdi. Ancak, söz konusu olan, *neyin* dalgalarıdır? İlk önerilerden biri, Avusturyall fizikçi Erwin Schrödinger'in, dalgaların "düzlenen" elektronlar olduğu açıklamasıydı. Bu, elektron dalgasının ne olduğuna dair bir kısım "sezgi'ler doğuruyordu, ancak net bir kavrayış söz konusu değildi. Bir şeyi düzlediğinizde, bir kısmı orada bir kısmı burada kalır. Fakat bir elektronun yarısı şurada, bir elektronun üçte biri burada gibi herhangi bir bölünme durumuyla karşılaşılmaz. Böyle olunca, düzlenen

elektronun aslında ne olduğunu anlamamız da güçleşmektedir. Bir alternatif olarak. Alman fizikçi Max Born 1926'da Schrödinger'in elektron dalgasıyla ilgili yorumunu önemli ölçüde geliştirdi. Bohr ve meslektaşlarınca güçlendirilen onun bu yorumu bugün hâlâ geçerlidir. Born'un önerisi kuantum kuramının en tuhaf unsurlarından biridir, fakat buna rağmen önemli sayıda deneysel veriyle desteklenmektedir. Born, elektron dalgasının *olasıkk* açısından yorumlanması gerektiğini ileri sürdü. Dalganın büyüklüğünün (daha doğrusu boyunun karesinin) *geniş* olduğu yerler, elektronun bulunma olasılığının *daha yüksek* olduğu yerler, büyüklüğünün *a-~* olduğu yerler ise elektronun bulunma olasılığının daha *düşük* olduğu yerlerdir. Şekil 4.9'da bir örnek görülmektedir.

Bu, gerçekten tuhaf bir fikirdir. Temel fiziğin açık ve kesin anlatımında olasılığın işi nedir, öyle değil mi? Olasılığın at yarışlarında, yazı tura oyunlarında, rulet masasında görünmesine alışkınız, ancak bu gibi durumlarda olasılık, yalnızca bilgimizin *yetersizliğini* gösterir. Rulet tekerleğinin hızını, beyaz bilyenin ağırlığı ile sertliğini, tekerleğe düştüğü nokta ile o andaki hızını, odacıkları oluşturan maddenin vb. özelliklerini *tam olarak* bilseydik ve hesaplarımızı yapmaya yetecek denli güçlü bilgisayarlarımız olsaydı, klasik fiziğe göre bilyenin nerede duracağına dair kesin bir tahminde bulunabilirdik. Kumarhaneler, bahis koymadan önce tüm bu bilgileri toplayıp gerekli hesapları yapma konusundaki yetersizliğimize güvenir. Fakat rulet masasında karşılaştığımız türden olasılığın, dünyanın nasıl işlediğine dair özellikle temel öneme sahip bir şeyi yansıtmadığını görüyoruz. Kuantum mekaniği ise bundan farklı olarak, olasılık kavramını daha derin bir düzeyde evrene yerleştirir. Born'a ve elli yılı aşkın süredir devam eden deneylere göre, maddenin dalga niteliği, bizzat maddenin temelde olasılıkçı bir yaklaşımla betimlenmesi gerektiği anlamına geliyor. Bir kahve fincanı ya da rulet tekerleği gibi makro ölçeklerdeki nesneler açısından de Broglie'nin kuralı, maddenin dalgaya benzer niteliğinin neredeyse fark edilmez olduğunu, olağan durumlarda kuantum mekaniğiyle ilişkili olasılığın tümüyle görmezden gelinebileceğini gösteriyor. Fakat mikro düzeyde, yapabileceğimiz en iyi şeyin, bir elektronun belli

biryerde belli bir bulunma olasılığı taşıdığını söylemek olduğunu öğreniyoruz.



Şekil 4.9 Elektronla ilişkilendirilen dalga, elektronun bulunması en olası yerde en büyük durumdadır, elektronun bulunma olasılığının az olduğu yerlerde dalganın boyutları da giderek küçülür.

Olasılıkçı yorumlamanın şöyle bir üstünlüğü vardır: Bir elektron dalgası, bir engele çarpıp çok çeşitli dalgacıklar oluşturmak gibi, diğer dalgaların yaptıklarını yapabiliyorsa, bu durum elektronun kendisinin farklı parçalara ayrıldığı anlamına gelmemektedir. Bu, daha çok, artık elektronun ihmal edilemez bir olasılık içerisinde *bulunabileceği* birçok yer olduğu anlamına gelir. Pratikte bu, şu anlama gelmektedir: Bir elektronun kullanıldığı bir deney tekrar tekrar, tam olarak aynı şekilde gerçekleştirilirse, elektronun konumuna ait ölçümlerde tam olarak hep aynı cevap *bulunmayacaktır.* Daha çok, deney tekrarlandıkça her seferinde farklı sonuçlara ulaşılacaktır ve bu sonuçlara bakıldığında, bir elektronun belli biryerde kaç kez bulunacağının elektronun ola-silik dalgasının şekline bağlı olduğu görülecektir. Olasılık dalgasının (daha doğrusu, olasılık dalgasının karesinin) A'daki büyüklüğü B'deki büyüklüğünün iki katıysa, bu durumda kuram, deney birçok kere tekrarlandığında, elektronun B'de bulunduğundan iki kat daha fazla A'da bulunacağı tahmininde bulunur. Deneylerin kesin sonuçları tahmin edilemez. Yapılabilecek en iyi şeyse, belli bir sonucun *ortaya çıkma* olasılığını tahmin etmektir.

Hal böyleyken, olasılık dalgalarının kesin biçimlerini matematiksel olarak belirleyebildiğimiz sürece, bunlarla ilgili olasılık tahminlerini

belli bir deneyi çok kereler tekrarlayarak test edebiliriz, böylece belli bir sonuca ya da başka bir sonuca ulaşma olasılığını deneysel olarak ölçmüş oluruz. De Broglie'nin önerisinden sadece birkaç ay sonra, Schrödinger olasılık dalgalarının ya da bilinen adıyla *dalga fonksiyonlarının* şeklini ve evrimini etkileyen denklemi saptayarak, bu amaca yönelik belirleyici bir adım attı. Schrödinger'in denklemi ve olasılıkçı yorumu, çok geçmeden müthiş derecede geçerli tahminlerde bulunmakta kullanılıyor olacaktı. Dolayısıyla, 1927ye gelindiğinde klasik masumiyet kaybolup gitmiş bulunuyordu. Tek tek bileşenlerine geçmişte bir anda hareket verilen ve bu bileşenlerin eşsiz şekilde belirlenen kaçınılmaz yazgılarını yerine getirdiği, saat gibi işleyen bir evrenin zamanı geride kaldı. Kuantum mekaniğine göre, evren katı ve kesin bir matematiksellikle evrilir, fakat bu çerçeve ancak herhangi bir geleceğin gerçekleşme olasılığını belirler, belirli bir geleceğin gerçekleşeceğini değil.

Birçokları bu sonucu rahatsız edici, hatta tümüyle kabul edilemez bulmuştur. Einstein bunlardan biriydi. Fizik alanında sarf edilmiş en unutulmaz cümlelerden biri olan, "Tanrı evrenle zar atmaz," sözleriyle kuantum kuramının ateşli yandaşlarına öğüt veriyordu. Einstein olasılığın, temel fiziğin bir açılımı olduğunu, rulet tekerleğinde çok ince bir akıl yürütme biçimini ortaya çıkardığını düşünüyordu; bu, anlayışımızda temel bir eksiklikti. Einstein'ın gözünde, evrende, kesin biçimi bir şans öğesi içeren bir geleceğe yer yoktu. Fiziğin, sırf belli bir gelişmenin gerçekleşme olasılığıyla ilgili değil, evrenin nasıl gelişeceğiyle de ilgili öngörüde bulunması gerekiyordu. Ancak çok ikna edici olanlarının bir kısmı ölümünden sonra gerçekleşen ardı sıra deneyler Einstein'ın yanıldığını kesin bir biçimde gösterdi. İngiliz kuramsal fizikçi Stephen Elawking'in bu konuda dediği gibi, "Kafası karışık olan Einstein'dı, kuantum kuramı değil."

Gelgeldim, kuantum mekaniğinin aslında ne anlama geldiği üzerine tartışma hararetli bir şekilde sürüyor. Kuantum kuramının eşitliklerini geçerli tahminlerde bulunmak için nasıl kullanmak gerektiği konusunda herkes hemfikir. Fakat olasılık dalgalarına sahip olmak ne anlama gelir, bir parçacık birçok olası gelecekten hangisini

izleyeceğini nasıl "seçer", gerçekten seçer mi yoksa kollara ayrılan bir nehir gibi durmadan genişleyen bir paralel evrenler alanında bütün olası geleceklerini mi yaşar, bu konularda bir fikir birliği yok. Yorumlamaya dayalı bu konular bir kitabı dolduracak ayrıntılı bir incelemeyi hak ediyor ve aslında, kuantum kuramıyla ilgili şu veya bu düşünme biçimini benimseyerek yazılmış çok sayıda mükemmel kitap bulunmaktadır. Fakat kesin görünen bir şey var ki, kuantum mekaniği, onu nasıl yorumlarsanız yorumlayın, evrenin, gündelik deneyimlerimizle karşılaştırdığımızda tuhaf görünen ilkeler üzerine temellendiğini göstermektedir.

Elem göreliliğin hem kuantum mekaniğinin verdiği büyük ders ise, evrenimizin temelde nasıl işlediğini derinlere inerek araştıracak olduğumuzda, beklentilerimizden çok çok farklı yönlerle karşılaşabileceğimizde. Derin sorular sorma cesareti, cevapları kabul edeceksek eğer, öngörülmemiş bir esneklik göstermemizi gerektirebilir.

Feynman'ın Bakış Açısı

Richard Feynman, Einstein'dan sonra, gelmiş geçmiş en büyük kuramsal fizikçilerden biridir. Feynman, kuantum mekaniğinin olasılıkçı özünü bütünüyle kabul etti, fakat II. Dünya Savaşı'nı izleyen yıllarda, kuram üzerine düşünmek için yeni ve güçlü bir yol önerdi. Sayısal tahminler yönüyle, Feynman'ın bakış açısı, daha önceden olup bitenlere *tam anlamıyla uymaktadır.* Ancak, kullanılan formüller hayli farklıdır. Gelin bu bakış açısını, elektronla gerçekleştirilen Young deneyi bağlamında betimleyelim.

Şekil 4.8'le ilgili kafa karıştırıcı olan şey, elektronların her birinin ya sol delikten ya sağ delikten geçtiğini kafamızda canlandırmamız ve bu yüzden Şekil 4.4 ile 4.5'in, Şekil 4.6'da olduğu gibi, elde edilecek verileri tam olarak temsil etmesi için birleşmesini beklememizdir. Sağ delikten geçen bir elektron, solda bir delik bulunmasını dikkate almak durumunda değildir ve bu, tam tersi için de geçerlidir. Ortaya çıkan girişim örüntüsü, elektronları tek tek gönderecek bile olsak, her iki deliğe de duyarlı *bir şej* arasında bir üst üste binmeyi ve bir

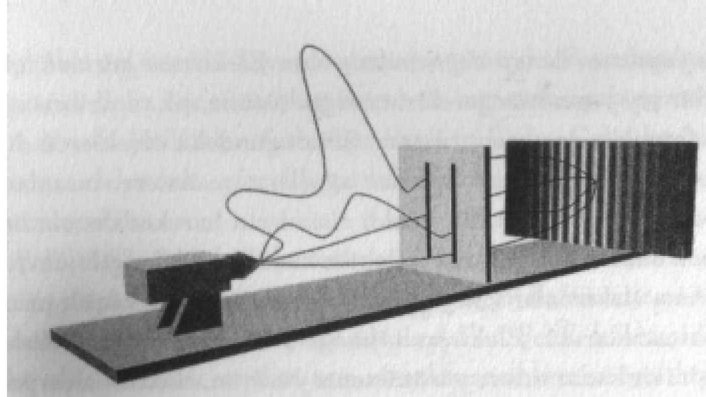
karışmayı gerektirir. Schrödinger, de Broglie ile Born bu olguyu elektronların her birini bir olasılık dalgasıyla ilişkilendirerek açıkladı. Şekil 4.7'deki su dalgaları gibi, elektronun olasılık dalgası her iki deliği "görür" ve karışımdan ileri gelen aynı tür bir girişime tabi olur. Şekil 4.7'de önemli ölçüde çalkalanmanın görüldüğü yerlerde olduğu gibi, olasılık dalgasının karışımla büyüdüğü yerler, elektronun bulunmasının olası olduğu yerlerdir; olasılık dalgasının karışımla küçüldüğü yerler, Şekil 4.7'deki çalkalanmanın çok az olduğu ya da hiç olmadığı yerler gibi, elektronun bulunma olasılığının olmadığı ya da hiç bulunmadığı yerlerdir. Bu olasılık kesitine göre dağılan elektronlar fosforlu ekrana tek tek çarpar ve böylece Şekil 4.8'dekine benzer bir girişim örüntüsü oluşturur.

Feynman farklı bir yol izledi. Elektronların her birinin ya sağ delikten ya sol delikten geçeceği yönündeki temel klasik varsayıma karşı çıktı. Bunun, şeylerin işleyişinin temel bir özelliği olduğu, dolayısıyla bu özelliğe karşı çıkmanın budalalık olduğunu düşünebilirsiniz. Ne de olsa, her bir elektronun hangi delikten geçeceğini belirlemek için delikler arasındaki bölgeye ve fosforlu ekrana bakılabilir, öyle değil mi? Evet, bu yapılabilir.

Ama yapılırsa, deney *değiştirilmiş* olur. Elektronu *görmek* için ona bir şey yapmanız gerekir; örneğin üstüne ışık tutabilirsiniz, yani fotonları ona çarptırırsınız. Şimdi gündelik ölçeklerde düşünecek olduğumuzda, fotonlar ağaçlara, resimlere, insanlara çarpan, görece büyük bu maddi cisimlerin hareket durumunu aslında etkilemeyen, ihmal edilebilir küçük sondalar gibi davranır. Ama elektronlar kolayca fark edilemeyen, çok küçük madde parçacıklarıdır. Elektronun hangi delikten geçtiğini belirleme işini ne kadar titizce yürütürseniz yürütün, elektrona çarpan fotonlar, onun sonraki hareketini mutlaka etkiler. Hareketteki bu değişiklik, deneyin sonuçlarını değiştirir. Deneyler göstermiştir ki, bu deneyi, her bir elektronun hangi delikten geçtiğini belirleyecek kadar değiştirirseniz, sonuç olarak Şekil 4.8'deki tablo değişir ve Şekil 4.6'daki tablo ortaya çıkar! Kuantum dünyası, her bir elektronun ya sol ya da sağ delikten geçip gidiyor olduğu bir kez saptandığında, iki delik arasındaki girişimin ortadan kalktığını bize garanti eder.

Böylece, Dünya'daki deneyimimiz, elektronların her birinin deliklerin birinden ya da diğerinden geçmesini gerektiriyormuş gibi görünse de, Feynman'ın bu şekilde meydan okumasının haklı gerekçeleri vardı; çünkü 1920'lerin sonlarına gelindiğinde, fizikçiler gerçekliğin görünüşte bu temel niteliğini doğrulama yönünde herhangi bir girişimin deneyi mahvedeceğini anladılar.

Feynman, fosforlu ekrana ulaşan her bir elektronun aslında her iki delikten birden geçtiğini iddia etti. Bu, kulağa çılgınca geliyor ama durun, işler daha da karışıyor. Feynman, her bir elektronun kaynaktan çıkıp fosforlu ekranda belirli bir noktaya doğru ilerlerken aslında *olast bütün yollan eşzamanlı olarak kat ettiğini* savunuyordu: Şekil 4.10'da birkaç yol gösterilmiştir. Elektron, muntazam bir yol izleyip sol delikten geçer. Eş zamanlı olarak yine muntazam bir yol izleyip sağ delikten geçer. Sol deliğe doğru yönelir, fakat aniden yolunu değiştirip sağ delikten geçer. İleri geri kıvrılarak, sonunda sol delikten geçer. Sol delikten geçip fosforlu ekrana ulaşmadan önce uzun bir yolculukla Andromeda galaksisini dolanır. Bu, durmaksızın devam eder gider. Feynman'a göre, elektron başlangıç noktasını varış noktasına bağlayan *her* olası yolu eş zamanlı olarak "tüketir."



Şekil 4.10 Feynman'ın kuantum mekaniği formülüne göre, parçacıkların bir yerden diğerine giderken olası her yol boyunca seyahat ettiği düşünülmelidir. Burada bir tek elektron için ışık kaynağı ile Fosforlu ekran arasındaki sonsuz sayıda yoldan birkaçı gösterilmiştir. Bu bir tek elektronun aslında iki delikten de geçtiğine dikkat edin.

Feynman bu yolların her birine bir numara verebileceğini, öyle ki hepsinin ortalamasının dalga fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak hesaplanan olasılıkla tam olarak aynı sonucu vereceğini gösterdi. Bu yüzden, Feynman'ın bakış açısına göre, elektronla bir olasılık dalgasının ilişkilendirilmesi gerekmemektedir. Onun yerine, aynı ölçüde, hatta biraz daha tuhaf bir şeyi düşünmemiz gerekmektedir. Her zaman tümüyle bir parçacık olarak görülen elektronun ekranda belli bir noktaya ulaşma olasılığı, oraya ulaşan tüm olası yolların bileşik etkisinden oluşmaktadır. Bu da Feynman'ın kuantum mekaniğine "yolların toplamı" yaklaşımı olarak bilinir.'

İşte bu noktayı kavramamızda klasik eğitimimiz yetersiz kalmaya başlıyor: Nasıl oluyor da bir elektron *aynı anda* farklı yolları, hem de sayıları sonsuzu bulan farklı yolları katediyor? Bu, savunulabilir bir itiraz olarak görünüyor, fakat kuantum mekaniği -dünyamızın fiziği- böyle sıradan itirazların vaktinin geçtiğini görmemizi zorunlu kılıyor. Feynman'ın yaklaşımının kullanıldığı hesapların sonuçları, dalga fonksiyonu yaklaşımının kullanıldığı hesaplarla, onlar da deneylerle uyuşmaktadır. Doğanın neyin anlamlı olduğunu neyin olmadığını buyurmasına izin vermek zorundayız. Feynman bu gerçeği şu sözlerle ifade etmektedir: "[Kuantum mekaniği], sağduyunun bakış açısına göre doğayı saçma olarak betimler. Deneyler hiçbir şekilde kuramın aksini söylememektedir. Bu yüzden doğayı olduğu gibi, saçmalığıyla kabul edebileceğinizi umuyorum."

Yine de, mikro ölçeklerde incelendiğinde doğa, ne kadar saçma bulunursa bulunsun, Dünya'da gündelik ölçeklerde de-neyimlenen sıradan olayları açıklayabilmemiz için şeylerin bir-birleriyle uyuşması gerekir. Bu amaçla Feynman, beysbol topları, uçaklar ve gezegenler, yani atomaltı parçacıklara kıyasla büyük nesnelerin hareketini incelerseniz, yolların her birine bir numara verme kuralının, hepsinin birleşik etkisi dikkate alındığında, *biri dtşmda diğer hepsinin birbirini iptal ettiğni* göstermiştir. Aslında nesnenin hareketi söz konusu olduğunda, sonsuz sayıdaki yoldan yalnızca biri önemlidir. Bu yol da tam olarak Newton'un hareket yasalarının gösterdiği, havada hareket eden nesnenin izlediği yoldur. Günlük yaşamda, nesnelerin -örneğin havaya fırlatılan bir topun- çıkış noktalarından varış noktalarına dek

tek ve biricik, öngörülebilir bir yol izliyor *gibi* görünmelerinin nedeni budur. Fakat mikro boyutlardaki nesneler için, Feynman'ın yolları numaralandırma kuralı, birçok farklı yolun bir nesnenin hareketine katkıda bulunabileceğini, genellikle de bulunduğunu göstermektedir. Örneğin Young deneyinde, bu yolların bir kısmı gözlemlenen girişim örüntüsünü ortaya çıkararak farklı deliklerden geçer. Bu nedenle mikro-dünyada, bir elektronun deliklerin yalnızca birinden ya da diğerinden geçtiğini ileri süremeyiz. Girişim örüntüsü ve Feynman'ın alternatif kuantum mekaniği formülü kesinlikle tam tersini göstermektedir.

Nasıl ki bir kitap ya da bir film hakkında çeşitli yorumlar, o kitap ya da filmin farklı yönlerini anlamamıza az ya da çok katkıda bulunuyorsa, kuantum mekaniğine farklı yaklaşımlar için de aynı durum geçerlidir. Yaptıkları tahminler her zaman tümüyle uyuşsa da, dalga fonksiyonu yaklaşımıyla Feynman'ın yolların toplamı yaklaşımı bize, neler olup bittiğine dair farklı düşünme biçimleri sunar. Daha sonra göreceğimiz gibi, bazı uygulamalarda, bu yaklaşımlardan biri ya da diğeri çok değerli bir açıklayıcı çerçeve sunabilir.

Kuantum Tuhaflığı

Geldiğimiz noktada, evrenin kuantum mekaniğine göre bu son derece farklı işleme tarzıyla ilgili belli bir fikir edinmiş olmalısınız. Henüz Bohr'un görüşleri başınızı döndürmediyse bile, şimdi ele alacağımız kuantum tuhaflığının az da olsa başınızı döndürmesi beklenebilir.

Mikrodünyada doğup büyüyen minyatür bir insan olduğumuzu farz ederek kuantum mekaniğini sorgulamadan benimsemek, görelilik kuramlarını sorgulamadan yürekten benimsemekten çok daha zordur. Yine de kuramın öyle biryönü var ki, kuantum mantığını klasik mantıktan tamamen ayıran köşe taşı niteliğinde bir unsur olduğu için, sezgilerimiz için bir işaret levhası işlevi görebilir. Alman fizikçi Werner Heisenberg'in 1927'de keşfettiği *belirsizlik ilkesidir* bu.

Bu ilke, daha önce aklınıza gelmiş olabilecek bir itirazdan doğmaktadır. Her bir elektronun hangi delikten geçtiğini (konumu) belirleme ediminin, elektronun sonraki hareketini (doğrusal hızı) zorunlu olarak etkilediğini belirtmiştik. Ancak, birinin varlığından, ona hafifçe dokunarak emin olabildiğimiz gibi, niçin elektronun konumunu da "iyice hafif' bir ışık kaynağıyla, ışığın elektronun hareketi üzerindeki etkisini iyice azaltarak be-lirleyemiyoruz? 19. yüzyıl fiziği bunu olanaklı görür. Buna göre, iyice soluk ışık veren bir lambayla (ve hiç olmadığı kadar duyarlı bir ışık detektörüyle) elektronun hareketi üzerinde yok denecek kadar küçük bir etki yaratabiliriz. Fakat kuantum mekaniği bu akıl yürütmede bir kusur olduğunu gösteriyor. Işık kaynağının yoğunluğunu azalttıkça, biliriz ki, ışığın saldığı foton sayısını azaltıyoruzdur. Fotonları artık tek tek göndermeye başladığımızda ise, ışığı daha fazla kısamayız; daha fazla kısmamız ışığı kapatmamız anlamına gelir. İncelememizi hassas kılan "hafifliğin" temelde kuantum mekaniğine dayalı bir sınırı vardır. Bu yüzden, elektronun konumunu ölçmeye çalışarak, onun doğrusal hızında yol açacağımız, daima minimum düzeyde bir değişiklik söz konusudur.

Evet bu, tam olmasa da doğrudur. Planck yasası, tek bir fotonun enerjisinin, frekansıyla doğru orantılı olduğunu söylüyordu (tersinden ifade edecek olursak, dalga boyuyla doğru orantılı olduğunu). Gitttikçe düşen frekanslarda (yani daha büyük dalga boylarında) ışık kullanarak daha hafif fotonlar oluşturabiliriz. İşte işin sırrı burada yatmaktadır. Bir nesneye bir dalga gönderdiğimizde, edineceğimiz bilgi sadece nesnenin yerini *dalganın dalga boyuna eşit bir hata payıyla* belirlememize yetecektir. Bu önemli olguyla ilgili sezgilerimizi harekete geçirebilmek için kocaman, hafifçe su yüzeyinin altında kalmış bir kaya parçasının konumunu, okyanusta geçip giden dalgaları nasıl etkilediğine bakarak belirlemeye çalıştığımızı düşünelim. Kayaya yaklaşırken, dalgalar birbirini izleyen, bir yukarıya bir aşağıya düzgün bir döngüsel dizi oluşturur. Kayayı geçtikten sonra tek tek dalga döngüleri bozulur; bu, orada batık bir kaya bulunduğuna işarettir. Fakat tıpkı bir cetvelin üzerindeki incecik çizgiler gibi, bir yukarıya bir aşağıya dalga döngüleri de dalga dizisini oluşturan en küçük birimlerdir, dolayısıyla onların nasıl bozulduğunu

inceleyerek kayanın yerini, sadece dalga döngülerinin uzunluğuna, yani dalgaların dalga boyuna eşit bir hata payıyla belirleyebiliriz. Işık örneğinde ise, ışığın bileşeni olan fotonlar, kabaca söyleyecek olursak, tek tek dalga döngüleridir (fotonların sayısıyla belirlenen dalga döngülerinin yüksekliğiyle); bundan dolayı, bir nesnenin yerini belirleyebilmek için foton, ancak bir dalga boyunun doğruluğu esas alındığında kullanılabilir.

Böylece, kuantum mekaniğine dayalı bir dengeleme edimiyle karşı karşıya bulunuyoruz. Yüksek frenkansta (kısa dalga boyunda) ışık kullanırsak, bir elektronun yerini daha yüksek bir kesinlikle belirleyebiliriz. Fakat yüksek frekanslı fotonlar çok enerjiktirler ve dolayısıyla elektronun hızını ve doğrultusunu bozucu bir biçimde etkilerler. Düşük frekanslı (uzun dalga boyunda) ışık kullanırsak elektronun hareketi üzerindeki etkiyi azaltmış oluruz, çünkü ışığı oluşturan fotonların enerjisi görece düşük olur; ancak, bu sefer de elektronun konumunu belirlemede kesinliği gözden çıkarmış oluruz. Heisenberg bu rekabeti sayıya döktü ve elektronun konumunu belirlemedeki kesinlik ile doğrusal hızını belirlemedeki kesinlik arasında matematiksel bir ilişki buldu. Heisenberg verdiğimiz örnekle uyumlu biçimde, bu ikisinin birbirine ters orantılı olduğunu gördü: Bir konumun ölçümündeki kesinlik ne kadar artarsa, doğrusal hızının ölçümündeki kesinlik zorunlu olarak o denli gerçek değerden uzak olur ve bunun tersi de geçerlidir. En önemlisi, tartışmamızı elektronun yerini belirleme konusunda tek bir araca bağlamış olsak da, Heisenberg, konum ölçümünün kesinliği ile doğrusal hız ölçümünün kesinliği arasındaki bu dengenin, kullanılan cihaz ya da yöntemden bağımsız temel bir gerçek olduğunu gösterdi. Newton'un, hatta Einstein'ın çizdiği, bir parçacığın hareketinin yeriyle doğrusal hızı üzerinden betimlenen çerçeveden farklı olarak, kuantum mekaniği mikro düzeyde *bu özelliklerin ikisinin birden tam bir kesinlikle bilinemeyebileceğini söyler.* Dahası, birini ne kadar kesin bilirseniz, öbürünün kesinliğinden o kadar az emin olursunuz. Bu durumu elektronlar açısından betimlemiş olsak da, söz konusu fikirler doğanın *tüm* bileşenleri için geçerlidir.

Einstein, kuantum mantığı, konum ile doğrusal hıza dair *bilgisini* kesinlikle sınırlıyor gibi görünse de, elektronun tam da her zaman düşündüğümüz şekilde, hâlâ kesin bir konum ile doğrusal hıza *sahip* olduğunu savunarak klasik fizikten bu kopuşu en aza indirmeye çalıştı. Fakat son zamanlarda, geçtiğimiz yıllarda aramızdan ayrılan İrlandalI fizikçi John Bell'in başını çektiği kuramsal ilerlemeler ile Alain Aspect ve çalışma arkadaşlarının deneylerden elde ettikleri sonuçlar Einstein'ın yanıldığını kesin bir biçimde gösterdi. Elektronlar -ve sonuç olarak her şey- aynı anda şu konumda *ve* şu hızda şeklinde betimlenemez. Kuantum mekaniği -yukarıda açıklandığı gibi- böyle bir önermenin deneysel olarak asla doğrulanamayacağının yanı sıra, çok kısa bir süre önce geçerlilik kazanan diğer deney sonuçlarıyla da doğrudan çeliştiğini göstermektedir.

Aslına bakarsanız, büyük bir kutunun içinde tek bir elektronu yakalayıp, elektronun konumunu daha kesin belirlemek için kutunun kenarlarını yavaş yavaş sıkıştıracak olsanız elektronun daha çılgın bir şekilde hareket ettiğini görürdünüz. Elektron sanki klostrofobiye kapılmış gibi yerinde duramayacak, giderek çok daha çılgın bir şekilde ve öngörülemez bir hızla zıplayarak kutunun kenarlarına çarpacaktı. Doğa, bileşenlerinin köşeye sıkıştırılmasına izin vermez, H-Bar'ın gerçek dünyada olduğundan *çok* daha büyük olduğunu, bu nedenle gündelik nesnelerin doğrudan kuantum etkilerine maruz kaldığını hayal ettiğimiz H-Bar'da, George ile Gracie'nin içkilerindeki buz küpleri de kuantum klostrofobisine çok fazla maruz kaldıkları için, bardakların içinde çok hareketli bir şekilde dönmeye başlamıştı. H-Bar bir fantazi diyarıydı -gerçekte H-bar aşırı derecede küçüktür-ama tam da bu tür bir kuantum klostrofobisi, mikrodünyada yaygın olan bir özelliktir. Mikro parçacıkların hareketleri daha küçük bölgelerle kısıtlandığında ve bu şekilde incelemeye tabi tutulduğunda, gittikçe daha çılgın bir hal alır.

Belirsizlik ilkesi, *kuantum tüneli* olarak bilinen çarpıcı bir etkiye de yol açar. Üç metre kalınlığındaki beton bir duvara plastik bir mermi atarsanız, klasik fizik sezgilerinizin olacağını söylediği şeyi doğrulayacaktır: Mermi size doğru geri tepecektir. Bunun sebebi,

plastik merminin böylesine sağlam bir engeli aşacak enerjiye sahip olmamasından başka bir şey değildir. Fakat temel parçacıklar düzeyinde, kuantum mekaniği şüpheye yer bırakmayan bir biçimde, mermiyi oluşturan parçacıkların dalga fonksiyonlarının -yani olasılık dalgalarının- hepsinin duvarı *aşıp geçen* küçük bir parçası olduğunu söyleyecektir. Bu da, merminin aslında duvara *girebilip* diğer taraftan *çıkabilmek* için az da olsa -sıfır değilse de- bir şansı olduğu anlamına gelir. Peki bu nasıl olabilir? Aklımız bir kez daha Heisenberg'in belirsizlik ilkesi karşısında bocalıyor.

Bunu anlayabilmek için, tam bir yoksulluk içinde olduğunuzu hayal edin. Hal böyleyken çok uzak bir akrabanızın öldüğünü, size de muazzam bir miras bırakmış olduğunu öğreniyorsunuz. Tek sorun, oraya gitmek için uçak bileti alacak paranızın olmaması. Kısa süreliğine bir borç olarak bilet paranızı verip yeni servetinizle aranızdaki engeli aşmanıza yardım ettikleri takdirde, döndüğünüzde borcunuzu geri ödeyeceğinizi söyleyerek arkadaşlarınıza durumu açıklıyorsunuz. Ancak, hiçbirinde borç verecek para çıkmıyor. Eski bir dostunuzun bir havayolu şirketinde çalıştığını hatırlayıp, ona da aynı ricada bulunuyorsunuz. O da ihtiyacınız olan parayı veremiyor, ama bir çözüm öneriyor. Havayolunun muhasebe sistemine göre, biletin parasını gideceğiniz yere varmanızın ardından 24 saat içinde ödeyecek olursanız, yola çıkmadan önce ödememiş olduğunuzu kimse bilmeyecektir. Böylece mirasınız üzerinde hak iddia edebiliyorsunuz.

Kuantum mekaniğinin hesap işlemleri buna çok benzemektedir. Heisenberg, konum ölçümünün kesinliği ile doğrusal hız ölçümünün kesinliği arasında ters orantılı bir ilişkinin olduğunu göstermenin yanı sıra, *enerji* ölçümünün kesinliği ile ölçümün yapılmasının *ne kadar süreceği* arasında da benzer bir ters orantı olduğunu göstermiştir. Kuantum mekaniği, bir parçacığın zaman içinde kesin olarak şu anda ve kesin olarak şu miktarda enerjiye sahip olduğunu söyleyemeyeceğimizi ileri sürer. Enerji ölçümlerinde kesinliğin artması, bu ölçümleri gerçekleştirme süresinin de uzaması anlamına gelir. Kabaca söyleyecek olursak, bu da bir parçacığın sahip olduğu enerjinin ciddi biçimde değişebileceğini, ancak bu değişimin,

yeterince kısa bir zaman ölçeğinde son bulmak koşuluyla gerçekleşebileceğini söyler. Tıpkı havayolu şirketinin muhasebe sisteminin yeterince hızlı ödemeniz koşuluyla uçak bileti parasını "borçlanmanıza izin vermesi"nde olduğu gibi, kuantum mekaniği de, Heisenberg'in belirsizlik ilkesiyle belirlenmiş bir zaman çerçevesi içinde serbest bırakması koşuluyla bir parçacığın enerji "borçlanması"na izin verir.

Kuantum mekaniğinin matematiği, enerji engeli ne kadar büyük olursa, bu yaratıcı ve çok titiz hesaplamanın gerçekten gerçekleşmesi olasılığının o kadar düşük olacağını gösteriyor. Ancak, beton bir duvarla karşılaşan mikro parçacıklar, klasik fiziğe göre imkânsız olanı yaparak yeterince enerjiyi borçlanabilmekte ve hatta bunu bazen gerçekleştirebilmektedir; başlangıçta gerekli enerjiye sahip olmadıkları bir bölgeye girip bir tünel açabilmektedirler. İncelediğimiz nesneler, gittikçe daha fazla parçacık bileşenleri içererek daha karmaşık hale geldikçe, söz konusu kuantum tüneli yine ortaya çıkabilir. Ancak bu çok daha zayıf bir olasılıktır, çünkü tek tek tüm parçacıklar tünel oluşturmak için *hep birlikte* yeterince şanslı olmak zorundadır. Fakat George'un purosunun kaybolması, bir buz küpünün bardağın camından geçmesi ve George ile Gracie'nin barın duvarından geçmeleri gibi şok edici olaylar *gerçekleşebilir, H-bar'ın* çok büyük olduğunu hayal ettiğimiz H-Bar gibi bir fantezi diyarında, bu tür kuantum tünelleri sıradan olaylardır. Ancak, kuantum mekaniğinin olasılık kuralları ve özellikle H-bar'ın gerçek dünyada çok küçük oluşu, bir duvarın içinden geçmeyi her saniye deneyecek olsanız, girişimlerinizden birinde duvardan geçip gidebilme şansınızın olabilmesi için, evrenimizin bugünkü yaşından çok daha uzun bir süre beklemeniz gerektiğini gösteriyor. Ebedi sabır (ve ömürle) er ya da geç duvarın öbür tarafında belirebilirsiniz.

Belirsizlik ilkesi kuantum mekaniğinin özünü yakalamaktadır. Nesnelerin belirli konum ile hızlara ve belirli anlarda belirli enerjilere sahip olması gibi, normalde sorgulanamayacak kadar temel olduğunu düşündüğümüz özellikler, Planck sabitinin gündelik dünya ölçeğine vurulduğunda çok çok küçük olmasının bir sonucu olarak

görülüyor artık. Bu kuantum farkmdalığı uzay-zamanın dokusu için kullanıldığında, "kütleçekimine bağlı gerilmeler"de ölümcül kusurlar olduğunu gösteriyor ve bu da bizi, fiziğin geçen yüzyılda karşı karşıya kaldığı üçüncü ve temel çatışmaya götürüyor. Asıl önemli olan ise budur.

V. Bölüm

Yeni Bir Kuram İhtiyacı: Genel Görelilik Kuantum Mekaniğine Karşı

Fiziksel evreni kavrayışımız, geçen yüzyıl içinde bir hayli derinlik kazandı. Kuantum mekaniği ve genel görelilik, bu kuramsal araçlar, atom ve atomaltı alanlardaki fiziksel olaylardan, galaksiler, galaksi kümeleri ölçeğinde gerçekleşen olgulara ve evrenin yapısına dek birçok olguyu anlayabilmemizi, bunlar hakkında sınanabilir öngörülerde bulunmamızı mümkün kılıyor. Bu devasa bir başarıdır. Epeyce sıradan bir galaksinin uzak bir köşesinde sıradan bir yıldızın etrafında dönen bir gezegene mahküm edilmiş varlıkların düşünce ve deneyler yoluyla, fiziksel evrenin en gizemli özelliklerinden bazılarını araştırıp anlayabilmiş olması gerçekten ilham vericidir. Yine de fizikçiler, evrenin en derinden, en temelden kavranmasını engelleyen gizemler tamamen ortadan kalkmadıkça doğaları gereği tatmin olmayacaklardır. Stephen Hawking'in "Tanrı'nın zihnini bilme yolunda ilk adım" diye nitelediği şey budur işte.

Kuantum mekaniği ile genel göreliliğin, en derin düzeydeki bu anlayışı sunmadığı yönünde birçok kanıt mevcuttur. Bu iki kuramın olağan uygulama alanları çok farklı olduğundan, birçok durumda ya kuantum mekaniğinin ya genel göreliliğin kullanılması gerekir, ikisinin birden değil. Fakat bazı uç durumlarda, şeylerin çok kütleli *ve* çok küçük olduğu durumlarda -iki örnek verelim: Kara deliklerin merkezlerinin yakınlarını ya da Büyük Patlama anında evrenin tamamını düşünün- tam bir kavrayış için hem genel göreliliğe hem kuantum mekaniğine ihtiyaç duyarız. Fakat tıpkı ateşle barutun bir araya gelmesinde olduğu gibi, kuantum mekaniğiyle genel göreliliği birleştirmeye çalıştığımızda, birleşmeleri bir felaketle sonuçlanır. Bu iki kuramın denklemleri gayet iyi formüle edilmiş fiziksel sorulara birlikte uygulandığında saçma cevaplara ulaşılır. Saçmalık genellikle şu biçimde ortaya çıkar: Bir sürece ilişkin kuantum mekaniğine dayalı olasılık tahminlerinde yüzde 20, yüzde 70, yüzde 93 gibi bir sonuca değil de, *sonsuz* sonucuna ulaşılır. Sonsuzu bir kenara bırakın, bir

olasılığın birden büyük olması saçmalık değil de nedir? Bir şeylerin cidden yanlış olduğu sonucuna varmak zorunda kalırız. Genel görelilik ve kuantum mekaniğinin temel özelliklerini yakından inceleyerek bu yanlış giden şeylerin ne olduğunu belirleyebiliriz.

Kuantum Mekaniğinin Kalbi

Fleisenberg, belirsizlik ilkesini keşfettiğinde, fizik keskin bir viraj aldı; eskiden geçtiği yola bir daha geri dönmeyecekti. Olasılıklar, dalga fonksiyonları, müdahale ve kuantumlar, hepsi de gerçekliği yeni biçimlerde görmeyi gerektirir. Yine de sıkı bir "klasik" fizikçinin, söylenecek ne varsa söylenip yapılacak ne varsa yapıldığında, bütün bu yoldan çıkmaların, kopuşların eski düşünme biçimlerinden çok da uzak olmayan bir çerçeve ortaya koyacağı yönünde bir umut ışığına sarılması gerekebilir hâlâ. Gelgelelim, belirsizlik ilkesi geçmişe tutunma girişimlerine temiz, kesin bir biçimde son vermiştir.

Belirsizlik ilkesi, küçük mesafelerde ve kısa zaman ölçeklerinde incelendiğinde evrenin çılgın bir yer olduğunu söyler bize. Önceki bölümlerde betimlediğimiz üzere, elektronlar gibi temel parçacıkların yerini belirleme girişimimizde bunun bazı kanıtlarını görmüştük. Elektronları daha yüksek frekanslarda ışığa tabi tutarak, onların konumlarını daha kesin ölçebiliriz, ama bunun da bir bedeli vardır, çünkü gözlemlerimiz daha yıkıcı bir hal almıştır. Yüksek frekanslı fotonlar çok fazla enerjiye sahiptir, dolayısıyla elektronlara sıkı bir "tekme" atarlar, onların hızları ve yönlerinde ciddi bir değişiklik yaratırlar. Konumlarını anlık olarak büyük bir doğrulukla bildiğiniz ama hareket hızlarını ve yönlerini hiç kontrol edemediğiniz çocuklarla dolu bir odadaki kaosu andıran bir durum çıkar ortaya; temel parçacıkların konumlarını hem de hızları ve yönlerini aynı anda bilemememiz, mikroskobik alanın içkin bir kargaşaya sahip olduğu anlamına geliyor.

Bu örnek belirsizlik ile kaos arasındaki temel ilişkiyi aktarıyor olsa da, aslında hikâyeyi eksik bir biçimde ortaya koyuyor. Örneğin belirsizliğin, ancak ve ancak bizim gibi sarsak doğa gözlemcileri sahneye çıktığında ortaya çıktığını düşünmenize yol açabilir. Bu

doğru *değildir.* Küçük bir kutuya sıkıştırılmış olmaya çılgınca tepki verip oraya buraya hızla hareket eden elektron örneği, bizi hakikate biraz daha yaklaştırıyor. Bir deneycinin yıkıcı fotonunun "sıkı tekmeleri" olmasa da, elektronun hızı ve yönü bir andan diğerine ciddi ve öngörülemez biçimde değişir. Fakat bu örnek bile, Heisenberg'in keşfinin gerektirdiği şaşırtıcı mikroskobik özellikleri tam olarak aydınlatmıyor. Tahayyül edilebilir en sakin ortamda, örneğin boş uzayda bile, belirsizlik ilkesi, mikroskobik bakış açısından muazzam bir faaliyet olduğunu ve bu faaliyetin mesafe ve zaman ölçeği küçüldükçe daha da arttığını söyler.

Kuantum hesaplan bunu anlayabilmemiz için elzemdir. Önceki bölümde, önemli bir mali engeli aşmak için geçici olarak borçlanmanız gerektiğinde olduğu gibi, elektron gibi bir parçacığın da kelimenin tam anlamıyla fiziksel bir engeli aşmak için geçici olarak enerji borçlanabileceğini görmüştük. Bu doğrudur. Fakat kuantum mekaniği önemli bir adım daha atıp bu benzetmeyi biraz daha ileriye taşımamızı gerektiriyor. Sürekli borç alan birini, o arkadaşından bu arkadaşına gidip para isteyen birini düşünün. Arkadaşları ona ne kadar kısa süre için borç verirse, borçlandığı miktar da o kadar büyük oluyor. Borçlan geri öde, borçlan geri öde; bitmek tükenmek bilmez bir yoğunlukla kısa süre zarfında geri ödemek üzere borçlanıyor. Wall Street'te hızlı, yoğun bir günde hisse senedi fiyatları nasıl inip çıkarsa, bizim borç müptelasının da herhangi bir anda sahip olduğu para miktarı aşırı dalgalanmalar geçiriyor, fakat her şey bittiğinde, mali durumu gösteriyor ki, başladığından daha iyi bir durumda değil.

Heisenberg'in belirsizlik ilkesi, evrende mikroskobik mesafe ve zaman aralıklarında benzer şekilde çılgınca bir enerji ve momentum değişiminin daima gerçekleşmekte olduğunu ileri sürer. Belirsizlik ilkesi, uzayda boş bir bölgede bile -örneğin boş bir kutunun içinde- enerji ve momentumun *belirsiz* olduğunu söyler: Kutunun boyutları küçüldükçe ve incelemenin yapıldığı zaman aralığı daraldıkça enerji ve momentum giderek uç noktalara varır. Sanki kutunun içindeki o uzay bölgesi, sürekli enerji ve momentum "borçlanır", evrenden durmadan "borç" alır, sonra da "geri öder". Peki ama, örneğin uzayın

sessiz, boş bir bölgesinde bu değiş tokuşun katılımcıları kimlerdir? Her şey. Kelimenin tam anlamıyla her şey. Enerji (ve momentum da) nihai para birimidir. $E=mc^2$ formülü, enerjinin maddeye, maddenin de enerjiye çevrilebileceğini söyler. Nitekim enerji değişimi yeterince büyükse, bir anda bir elektronun ve onun anti madde yoldaşı pozitronun varlık bulmasına yol açabilir, başta o bölge boş olsa bile! Bu enerjinin çabucak geri ödenmesi gerektiğinden, bu parçacıklar bir an sonra birbirlerini ortadan kaldıracaklar, oluşumları sırasında borç alman enerjiyi serbest bırakacaklardır. Aynı şey enerji ve momentumun alabileceği başka bütün biçimler -başka parçacıkların ortaya çıkıp birbirlerini ortadan kaldırması, elektromanyetik alanda çılgın salınımlar, zayıf ve güçlü kuvvet alanlarındaki dalgalanmalar-için de geçerlidir; kuantum mekaniğine dayalı belirsizlik, evrenin mikroskobik ölçeklerde kaynaşıp duran, kaotik, karmakarışık bir arena olduğunu anlatır. Feynman'ın da dediği gibi, "Yaratılıyor, ortadan kaldırılıyor, yaratılıyor ortadan kaldırılıyor; ne zaman kaybı ama!" Ortalamada borçlanma ve geri ödeme birbirini ortadan kaldırdığı için, mikroskobik ölçüm dışında başka bir yolla bakıldığında uzamda boş bir bölge sakin, sessiz görünür. Fakat belirsizlik ilkesi makro ölçeklerdeki ortalamanın, mikroskobik düzeydeki bir faaliyet zenginliğini gözden gizlediğini ortaya koymuştur. Biraz sonra göreceğimiz gibi, genel görelilik ile kuantum mekaniğini birleştirmemizin önündeki *engelde* bu kaynaşmadır.

Kuantum Alan Kuramı

1930' lar ve 1940'lar boyunca, birkaçının ismini verecek olursak Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Julian Schwinger, Freeman Dyson, Siriltiro Tomonaga ve Feynman'ın başını çektiği kuramsal fizikçiler durmak dinlenmek nedir bilmeden mikroskobik düzeydeki bu kargaşayla başa çıkabilecek matematiksel bir formellik bulmaya çalıştılar. Schrödinger'in kuantum dalgası denkleminin (IV. Bölüm'de bahsetmiştik) aslında mikroskobik ölçeklerdeki fiziğin sadece yaklaşık bir betimlemesi olduğunu gördüler; mikroskobik kargaşa fazla derinden (deneysel ya da kuramsal olarak) incelenmeye çalışamadığında gayet işe yarayan bir yaklaşıklıktı bu, aksi halde kesinlikle başarısız oluyordu.

Schrödinger'in kuantum mekaniği formülasyonunda görmezden geldiği, temel önemdeki fizik kuralı özel görelilikti. Aslına bakarsanız, Schrödinger başta özel göreliliği formülasyonuna dahil etmeye *çalışmıştı,* fakat sonuçta vardığı kuantum denklemi, deneylerdeki hidrojen ölçümleriyle ters düştüğü anlaşılan bazı tahminlerde bulunmasına yol açmıştı. Bu yüzden de fiziğin eski geleneklerinden birini, böl ve fethet geleneğini benimsemişti: Yeni bir kuram geliştirirken fiziksel evren hakkında bütün bildiklerimizi bir sıçramada birleştirmeye çalışmak yerine, araştırmalarda elde edilen yeni bulguları sırasıyla kurama dahil eden birçok küçük adım atmak genellikle daha çok işe yarar. Schrödinger, deneysel olarak keşfedilmiş dalga-parçacık ikiliğini birleştiren matematiksel bir çerçeve arayıp bulmuştu, ama anlama çabasının bu ilk aşamalarında özel göreliliği işin içine dahil etmemişti.

Fakat çok geçmeden fizikçiler, özel göreliliğin uygun bir kuantum mekaniği çerçevesinden bakıldığında temel önemde olduğunu fark etti. Çünkü, mikroskobik kargaşa, enerjinin kendini çok çeşitli biçimlerde gösterebileceğini kabul etmemizi gerektirir; özel göreliliğe dayalı $E=mc^2$'den kaynaklanan bir kavrayıştır bu. Schrödinger'in yaklaşımı özel göreliliği görmezden gelerek, madde, enerji ve hareketin şekil alabilirliğini görmezden geliyordu.

Fizikçiler, özel görelilik ile kuantumu birleştirme yönündeki yol açıcı ilk çabalarını, elektromanyetik kuvvete ve elektromanyetik kuvvetin maddeyle etkileşimine yoğunlaştırdı, ilham verici bir dizi gelişme sonucu kuantum elektrodinamiğini yarattılar. Daha sonra *görelilikçi kuantum alan kuramı,* kısaca *kuantum alan kuramı* denecek olan kuramın bir örneğiydi bu. Kuantumdu çünkü, olasılıkla ve belirsizlikle ilgili bütün meseleler en baştan kurama dahil edilmişti; alan kuramıydı, çünkü kuantum ilkelerini önceki klasik kuvvet alanı kavrayışıyla, bu örnekte Maxwell'in elektromanyetik alan kuramıyla, birleştiriyordu. Son olarak görelilikçiydi, çünkü özel görelilik daha başta kurama dahil edilmişti. (Bir kuantum alanı için görsel bir metafor istiyorsanız, klasik bir alan imgesini gözünüzün önüne getirebilirsiniz pekâlâ; uzaya yayılmış görünmez alan hatlarından bir okyanus hayal edin; bu imgeyi iki biçimde rafine etmeniz gerekir.

Önce parçacık bileşenlerinden oluşan bir kuantum alanı hayal etmeniz gerekir, elektromanyetik alan için fotonlar gibi, ikinci olarak, parçacıkların kütleleri ve hareketleri biçimindeki enerjinin sonu gelmez bir biçimde, uzay ve zamanda sürekli titreşen bir kuantum alanından diğerine ileri geri gidip geldiğini hayal etmelisiniz.)

Kuantum elektrodinamiği, doğal olgularla ilgili olarak şimdiye dek geliştirilmiş en kesin kuramdır. Kesinliğinin bir örneği, Cornell Üniversitesi'nde parçacık fizikçisi olarak çalışan, son 30 yıldır kuantum elektrodinamiğini kullanarak elektronların bazı ayrıntılı özelliklerini hesaplayan Toichiro Kinoshita'nın çalışmalarında görülebilir. Kinoshita'nın hesapları binlerce sayfayı doldurur ve nihayetinde sonuçlandırılmaları için dünyanın en güçlü bilgisayarlarının kullanılmasını gerektirmiştir. Fakat gösterilen bu çabaya değmiştir: Flesaplamalar, elektronlar hakkında, bir milyarda bir parçadan çok daha iyi düzeyde bir geçerlilikle deneysel olarak doğrulanan tahminler doğurmuştur. Soyut kuramsal hesaplarla gerçek dünya arasında hayret verici bir uyuşma olduğunu göstermektedir bu. Fizikçiler kuantum elektrodinamiği sayesinde, "en küçük ışık demetleri" olarak fotonların rolünü kesinleştirip onların elektronlar gibi elektrik yüklü parçacıklarla etkileşimlerini matematiksel bakımdan eksiksiz, öngörülerde bulunabilir ve ikna edici bir çerçevede ortaya koyabilmişlerdir.

Kuantum elektrodinamiğinin başarısı, 1960'larda ve 1970'lerde başka fizikçiler açısından, zayıf ve güçlü kuvvetler ile kütleçekimi kuvvetine dair kuantum mekaniğine dayalı bir anlayış geliştirmek için benzer bir yaklaşım izleme konusunda ilham verici olmuştur. Zayıf ve güçlü kuvvetler açısından bu girişimin son derece verimli bir saldırı hattı olduğu anlaşılmıştır. Kuantum elektrodinamiğine benzer şekilde, fizikçiler güçlü ve zayıf kuvvetler için sırasıyla *kuantum kromodinamiği* ve *kuantum elektrozayıf kuram* denilen kuantum alan kuramları inşa etmeyi başarmıştır. "Kuantum kromodinamiği", "kuantum güç dinamiği"ne kıyasla kulağa daha renkli gelen bir isimdir, ama daha derin bir anlamı olmayan bir isimdir işte; öte yandan "elektrozayıf" terimi doğadaki kuvvetleri kavrayışımız açısından önemli bir köşe taşıdır.

Sheldon Glashow, Abdus Salam ve Steven Weinberg Nobel Ödülü kazanan çalışmalarıyla, zayıf ve elektromanyetik kuvvetlerin, etrafımızdaki dünyada tezahürleri son derece farklı olsa da, kuantum alan kuramına dayalı tanımları itibarıyla doğal olarak *birleşmiş* olduğunu göstermiştir. Nihayetinde zayıf kuvvet alanları, atomaltı ölçekler dışında bütün ölçeklerde, kuvvetlerini yok denecek kadar yitirirler; elektromanyetik alanlarsa -görünür ışık, radyo ve TV sinyalleri, X ışınları- makroskobik düzeyde tartışılmaz bir varlık gösterir. Yine de Glashow, Salam ve Weinberg özünde, yeterince yüksek enerji ve sıcaklıkta -örneğin, Büyük Patlama'dan bir saniyenin bir bölümü kadar bir süre sonra ortaya çıkan enerji ve sıcaklık ortamında- elektromanyetik ve zayıf kuvvet alanlarının birbirine karıştığını, birbirinden ayrılamaz özellikler kazandığını ve daha doğru bir biçimde *elektrozayıf* alanlar olarak adlandırılabileceğini göstermişti. Büyük Patlama'dan sonra olduğu gibi, sıcaklık hızla düşerse, elektromanyetik ve zayıf kuvvetler, yüksek-sıcaklığa özgü ortak biçimlerinden farklı bir biçimde -daha sonra betimleyeceğimiz *simetri kırılması* diye bilinen bir süreçle- *şekil alırlar,* dolayısıyla da bugün içinde yaşamakta olduğumuz soğuk evrende birbirlerinden farklı görünürler.

Böylece bir çetele tutacak olursak, 1970'lere gelindiğinde fizikçiler dört kuvvetten üçüne (güçlü, zayıf, elektromanyetik) dair kuantum mekaniğine dayalı anlaşılır ve başarılı tanımlar geliştirmişler, üç kuvvetten ikisinin (zayıf ve elektromanyetik kuvvetin) aslında aynı kaynaktan (elektrozayıf kuvvetten) geldiğini göstermişlerdi. Son yirmi yıl içinde fizikçiler, kütle çekimle ilgili olmayan bu üç kuvvetle ilgili -kendi aralarındaki ve I. Bölüm'de tanıtılan madde parçacıklarıyla ilgili davranışları itibarıyla- kuantum mekaniğine dayalı yaklaşımı muazzam sayıda deneysel incelemeye tabi tuttu. Kuram bütün bu sınavları tam bir kendine güvenle karşıladı. Deneylerde 19 ayrı parametre ölçülüp (Tablo 1.1'de gösterilen parçacık kütleleri, I. Bölümün birinci dipnotundaki tabloda verildiği üzere bu parçacıkların kuvvet yükleri, Tablo 1.2'de gösterildiği üzere kütle çekimle ilgili olmayan üç kuvvetin gücü, bunların yanı sıra tartışmamız gerekmeyen bazı rakamlar) bu rakamlar kuramcılar tarafından, madde parçacıklarıyla, güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetlerle

ilgili kuantum alan kuramlarına dahil edildiğinde, kurama dayalı olarak mikrokozmos hakkında yapılan tahminlerin deneysel sonuçlarla çarpıcı bir uyuşma gösterdiği görüldü. Aynı şey, bugünkü teknolojinin sınırları itibarıyla maddeyi metrenin milyarda birinin milyarda biri küçüklüğünde parçacıklar haline getirebilen enerjiler için de geçerlidir. Bu yüzden de fizikçiler kütle çekimle ilgili olmayan üç kuvvet ve üç maddecik ailesiyle ilgili kurama standart parçacık fiziği kuramı, (daha da sıklıkla) *standart parçacık fiziği modeli* der.

Haberci Parçacıklar

Standart modele göre, nasıl ki foton bir elektromanyetik alanın en küçük bileşeniyse, güçlü ve zayıf kuvvet alanları da en küçük bileşenlere sahiptir. I. Bölüm'de kısaca tartıştığımız üzere, güçlü kuvvetin en küçük demetleri *glüonlar* olarak bilinir, zayıf kuvvetin en küçük demetleri ise *zayıf ayar bozonları* (daha doğrusu W bozonlar ve Z bozonlar) olarak bilinir. Standart model, bu parçacıkları iç yapıdan yoksun olarak düşünmemizi söyler; bu çerçevede üç madde ailesindeki parçacıklar kadar temeldirler.

Fotonlar, glüonlar ve zayıf ayar bozonları oluşturdukları kuvvetlerin iletimini sağlayan mikroskobik mekanizmayı yaratır. Örneğin, elektrik yüklü bir parçacığın, benzer elektrik yüküne sahip bir parçacığı itmesini kabaca şöyle düşünebilirsiniz: Her parçacık bir elektrik alanıyla -bir "elektrik özünden" bir "bulut"laya da "duman'la çevrilidir, her bir parçacığın hissettiği kuvvet de beraberlerindeki kuvvet alanlarının birbirini itmesinden doğar. Birbirlerini nasıl ittiklerinin mikroskobik olarak betimlenmesiyse biraz daha farklıdır. Elektromanyetik bir alan, bir foton sürüsünden oluşur; yüklü iki parçacık arasındaki etkileşim esasen birbirleri arasındaki foton "ateşlemeleri'nden doğar. Kaba bir benzetme yapalım: Buz pateni yaparken birlikte buz pateni yaptığınız birinin hareketini ve kendi hareketinizi ona bir kucak dolusu bowling topu yuvarlayarak etkileyebilirsiniz; tam da burada olduğu gibi elektrik yüklü iki parçacık da birbirlerine bu en küçük ışık demetlerini göndererek birbirlerini etkilerler.

Buz patencisi benzetmesindeki önemli bir kusur şudur: Patencilerin bowling topu yuvarlamaları her zaman "iticidir" - patencileri her zaman birbirinden ayırır. Oysa birbirine karşıt yüklere sahip parçacıklar da birbirlerine foton göndererek etkileşim kurarlar, fakat ortaya çıkan elektromanyetik kuvvet çekicidir. Sanki foton, kuvveti değil de alıcının söz konusu kuvvete nasıl karşılık vermesi gerektiğine dair bir *mesajı* aktarır. Benzer yüklü parçacıklar söz konusu olduğunda foton, "ayrılın" mesajını taşır, karşı yüklü parçacıklara da "birleşin" mesajını verir. Bu yüzden de foton bazen elektromanyetik kuvvetin *haberci parçacığı* olarak nitelenir. Keza glüonlar ve zayıf ayar bozonları da sırasıyla güçlü ve zayıf nükleer kuvvetlerin haberci parçacıklarıdır. Kuarkları protonlar ve nötronların içinde kilitli tutan güçlü kuvvet, tek tek kuarklar arasındaki glüon alışverişinden doğar. Glüonlar, deyim yerindeyse bu atomaltı parçacıkları birbirine bağlı tutan "tutkal"ı sağlar. Radyoaktif bozunumda görülen bazı türde parçacık transmutasyonlarmm gerisindeki zayıf kuvvet, zayıf ayar bozonlarıyla aktarılır.

Ayar Simetrisi

Fark etmişsinizdir, doğadaki kuvvetlere ilişkin kuantum kuramıyla ilgili tartışmamızdaki en tuhaf şey kütle çekimdir. Fizikçilerin diğer üç kuvvetle ilgili olarak kullanmış olduğu başarılı yaklaşımı dikkate alarak kütleçekimi kuvvetine dair de bir kuantum alan kuramı arandığını ileri sürebilirsiniz; bu kurama göre de kütleçekimi kuvvet alanının en küçük demeti olan *graviton,* bu alanın haberci parçacığı olacaktır. Şimdi, kütleçekimi dışındaki üç kuvvet alanına ilişkin kuantum kuramı, bu kuvvetlerle kütleçekimi kuvvetinin III. Bölüm'de karşımıza çıkmış bir yönü arasında çarpıcı bir benzerlik olduğunu ortaya koyduğundan bu iddia ilk bakışta gayet yerinde görünebilir.

Hatırlayalım: Kütle çekimi kuvveti bütün gözlemcilerin -hareket durumlarından bağımsız olarak- mutlaka eşit koşullarda olduğunu söylememizi mümkün kılıyordu. Normalde hızlandıklarını düşünebileceklerimiz bile, durduklarını iddia edebiliyorlardı, çünkü hissettikleri kuvveti bir kütleçekimi alanına gömülmüş olmalarına bağlayabiliyorlardı. Bu anlamda kütleçekimi simetriyi güçlendirir yani,

bütün olası gözlem noktalarının, bütün olası referans çerçevelerinin aynı ölçüde geçerli olmasını sağlar. Güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetler arasındaki benzerlik, hepsinin de benzer simetrilerle birbirine bağlı olmasıdır, fakat bu simetriler kütle çekimle ilişkilendirilen simetriye göre ciddi oranda soyuttur.

Epeyce incelikli olan bu simetri ilkelerini kabaca kavrayabilmek için, önemli bir örnek üzerine düşünelim. I. Bölümün birinci dipnotundaki tabloda belirttiğimiz üzere bütün kuarklar üç "renktedirler" (kırmızı, yeşil ve mavi denmiştir bu renklere, fakat bunlar sadece birer etiketten ibarettir, olağan görsel anlamda renklerle bir ilgisi yoktur); bu renkler kuarkm güçlü kuvvete nasıl karşılık vereceğini belirler, tıpkı kuarkm elektrik yükünün de elektromanyetik kuvvete nasıl karşılık vereceğini belirlemesinde olduğu gibi. Toplanan bütün veriler, benzer renkte (kırmızıyla kırmızı, yeşille yeşil, maviyle mavi) iki kuark arasındaki etkile simlerin hepsinin birbirinin benzeri olması anlamında, aynı şekilde renkleri benzemeyen iki kuark (kırmızıyla yeşil, yeşille mavi, maviyle kırmızı) arasındaki etkileşimlerin de birbirinin benzeri olması anlamında kuarklar arasında bir simetri olduğunu göstermektedir. Aslına bakılırsa veriler çok daha çarpıcı bir şeyi desteklemektedir. Bir kuarkm taşıyabileceği bu üç renk -üç farklı güçlü yük- belli bir biçimde değiştirilirse (lisanımızın bu canlı renkleri, kırmızı, yeşil ve mavi, örneğin sarı, çivit ve leylak rengine dönüştüğünde) bu değişimin ayrıntıları bir andan diğerine, bir yerden diğerine değiştirilecek olsa bile, kuarklar arasındaki etkileşim yine hiçbir şekilde yüklü olmayacaktır. Bu yüzden, nasıl ki bir kürenin rotasyon simetrisine örnek oluşturduğunu, zira onu elimizde döndürme şeklimizden ya da bakış açımızı değiştirmemizden bağımsız olarak her durumda aynı göründüğünü söyleyebiliyorsak, evrenin de *güçlü kuvvet simetrisinin* bir örneği olduğunu söyleyebiliriz: Fizik, kuvvet yükündeki bu değişikliklerle değişmez; bu değişikliklere tümüyle duyarsızdır. Tarihsel sebeplerle, fizikçiler güçlü kuvvet simetrisinin ayar simetrisine örnek teşkil ettiğini de söyler.

Esas önemli nokta şudur: Tıpkı genel görelilikte olası bütün gözlem noktaları arasındaki simetrinin kütleçekimi kuvvetinin

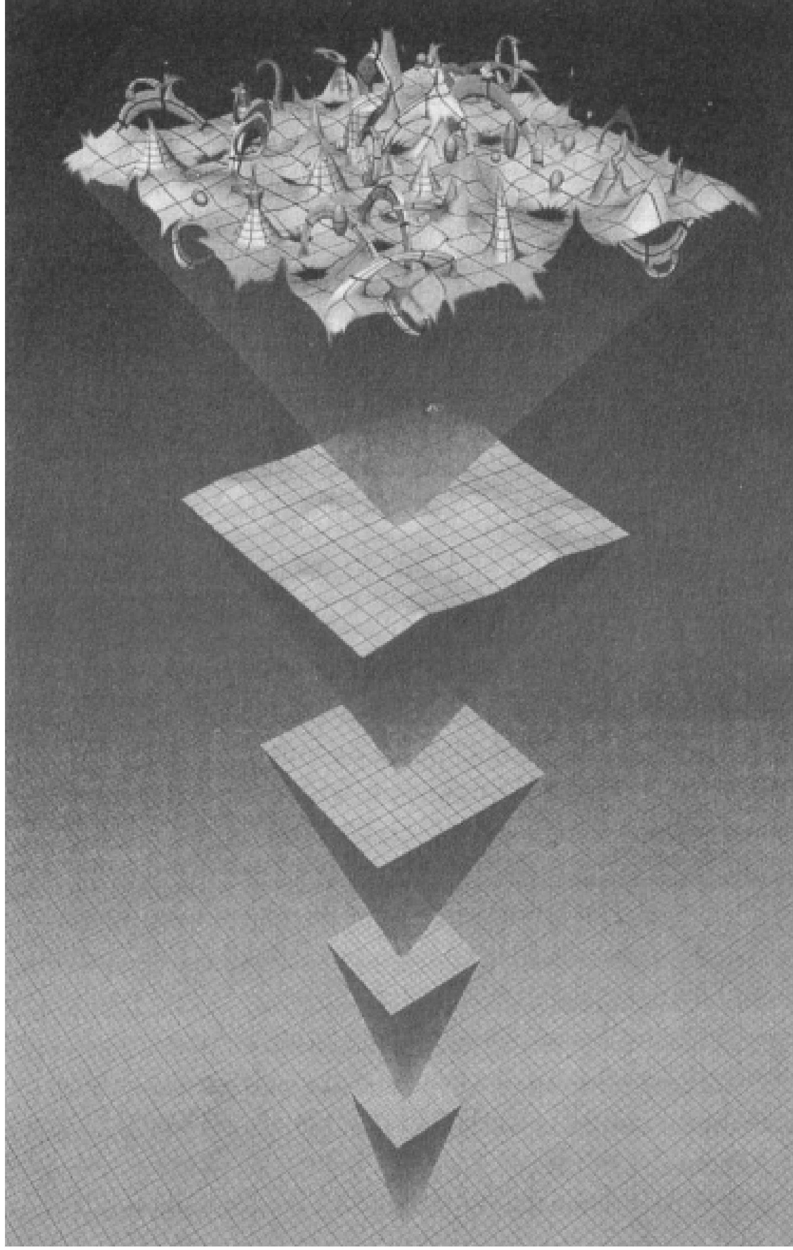
varlığını gerektirmesinde olduğu gibi, Hermann Weyl'in 1920'lerde, Chen-Ning Yang ve Robert Mills'in de 1950'lerde yaptığı çalışmalar da ayar simetrilerinin başka kuvvetlerin varlığını gerektirdiğini göstermektedir. Tıpkı hassas bir çevre kontrol sisteminin dış etkileri mükemmel düzeyde analiz ederek bir bölgedeki sıcaklığı, hava basıncını ve nemi tümüyle sabit tutmasında olduğu gibi, Yang ve Mills e göre belli türde kuvvet alanları da kuvvet yüklerindeki değişimleri mükemmel düzeyde analiz ederek parçacıklar arasındaki fiziksel etkileşimlerin hiçbir biçimde değişmeden kalmasını sağlayacaktır. Kuarkların renk değişimiyle ilişkilendirilen ayar simetrisi durumunda, gereken kuvvet, bizatihi güçlü kuvvetten başkası değildir. Yani güçlü kuvvet olmasaydı, fizik, yukarıda belirtilen renk yüklerindeki değişimlerden dolayı *değişirdi.* Bunu idrak etmiş olmamızın gösterdiği şey şudur: Kütle çekimi kuvveti ve güçlü kuvvet çok farklı özelliklere sahip olsalar da (örneğin kütleçekimin güçlü kuvvetten çok daha güçsüz olduğunu, muazzam derecede uzak mesafelerde faaliyet gösterdiğini hatırlayın), biraz benzer bir mirasa sahiptirler: Evrenin belli simetriler taşıyabilmesi için ikisine de gerek vardır. Dahası benzer bir tartışma, zayıfve elektromanyetik kuvvetler açısından da geçerlidir; onların da başka ayar simetrilerine bağlı olduğunu gösterir. Dolayısıyla dört kuvvetin hepsi de simetri ilkesiyle doğrudan ilişkilidir.

Dört kuvvetin bu ortak özelliği, bu bölümün başında ortaya atılan iddiaya gayet uygun görünmektedir. Bu iddianın ne olduğunu daha açık söyleyelim: Kuantum mekaniğini genel göreliliğe dahil etme çabamızda, kütleçekimi için de fizikçilerin diğer üç kuvvet için keşfetmiş olduğuna çok benzer bir kuantum alan kuramı aramamız gerekir. Yıllar var ki, bu akıl yürütme, büyük ve seçkin bir grup fizikçiyi sıkı sıkıya bu yolu izlemeye teşvik etmiştir, fakat bu yol tehlikelerle doludur, kimse de tam anlamıyla geçmeyi başaramamıştır. Nedenlerini görelim.

Genel Görelilik Kuantum Mekaniğine Karşı

Genel göreliliğin olağan uygulama alanı, geniş, astronomik mesafe ölçekleridir. Einstein'ın kuramına göre bu mesafelerde,

kütlenin yokluğu, Şekil 3.3'te görüldüğü üzere uzayın düz olduğu anlamına gelir. Genel göreliliği kuantum mekaniğiyle birleştirmeye çalışırken, odak noktamızı keskin bir biçimde değiştirmemiz ve uzayın *mikroskobik* özelliklerini incelememiz gerekir. Bunu Şekil 5.1'de mesafeyi küçültüp uzamsal dokunun daha küçük bölgelerini büyüterek gösterdik. Başta odak noktamıza yaklaştığımızda pek fazla bir şey olmaz; Şekil 5.1'de görüldüğü üzere büyütme işleminin ilk üç aşamasında uzayın yapısı aynı temel biçimini korur. Tümüyle klasik bir bakış açısından akıl yürüterek bu sakin ve düz uzay imgesinin, iyice küçük ölçeklerde de korunmasını bekleriz. Fakat kuantum mekaniği bu sonucu kökten değiştirmiştir. *Her şey,* belirsizlik ilkesine içkin olan kuantum dalgalanmalarına tabidir; kütleçekimi alanı bile. Klasik akıl yürütme, boş uzayın kütleçekimi alanının sıfır olduğunu söylese de, kuantum mekaniği bu alanın ortalamada sıfır olduğunu, ama gerçek değerinin kuantum değişmeleri sebebiyle yukarı aşağı dalgalandığını göstermiştir. Dahası belirsizlik ilkesi, kütleçekimi alanındaki dalgalanmaların çapının, dikkatimizi daha küçük uzay bölgelerine yoğunlaştırdığımızda daha da büyüyeceğini söyler. Kuantum mekaniği, hiçbir şeyin köşeye sıkıştırılmayı sevmediğini söyler; uzamsal odak noktasını daraltmak daha büyük dalgalanmalara yol açar.



Şekil 5,1 Uzayın bir bölgesini aşama aşama büyüterek, ultramikroskobik Özelliklerini inceleyebiliriz, Genel görelilik ile kuantum mekaniğini birleştirme girişimleri, büyütmenin en son aşamasında ortaya çıkan şiddetli kuantum dalgalanmalarına ters düşmektedir.

Kütle çekimi alanları bükülmeyle yansıtıldığına göre, bu kuantum dalgalanmaları, çevredeki uzamın giderek şiddetli biçimde çarpılması olarak kendini gösterir. Şekil 5.1'de büyümenin dördüncü

aşamasında ortaya çıkan bu tür çarpılmaların izlerini görüyoruz. Şekil 5.1'de beşinci düzeyde yaptığımız üzere, daha küçük mesafe ölçeklerini incelediğimizde kütleçekimi alanında kuantum mekaniğine dayalı rasgele salmışların uzayda çok ciddi bükülmelere yol açtığını, o kadar ki uzayın artık III. Bölüm'deki tartışmamızda kullandığımız branda benzetmesindeki gibi hafif kıvrımlı geometrik bir nesneye artık hiç benzemediğini görürüz. Aksine, şeklin üst kısmında gördüğümüz, püskürmelerin olduğu, karışık, kıvrımlı biçimi alır. John Wheeler, uzayın (ve zamanın) böyle ultramikroskobik düzeyde incelenmesinin gözler önüne serdiği kargaşayı betimlemek için *kuantum köpüğü* terimini geliştirmiştir; bu terim, evrende sol ve sağ, ileri ve geri, yukarı ve aşağı (hatta önce ve sonra gibi) geleneksel kavramların anlamlarını yitirdiği, hiç bilmediğimiz bir alanı betimler. Genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki temel uyumsuzluğa böyle kısa mesafe ölçeklerinde rastlarız. Genel göreliliğin ana ilkesi düz, pürtüksüz uzamsal geometri kavramı, kısa mesafe ölçeklerindeki kuantum dünyasındaki şiddetli dalgalanmalarla yıkılır. Ultramikroskobik ölçeklerde incelendiğinde, kuantum mekaniğinin temel özelliği -belirsizlik ilkesi- genel göreliliğin temel unsuruyla, düz, pürtüksüz bir geometriye sahip uzay (uzay-zaman) modeliyle doğrudan çatışmaktadır.

Pratikte bu çatışma çok somut bir biçimde kendini gösterir. Genel görelilik denklemleriyle kuantum mekaniği denklemlerini birleştiren hesaplar genelde hep aynı saçma sonucu verir: Sonsuzluk. Eski kafalı bir öğretmenin avucunuza indirdiği bir cetvel darbesi misali, sonsuz cevabı da doğanın hayli yanlış bir şey yaptığımızı söyleme biçimidir. Genel görelilik denklemleri, kuantum köpüğünün fıkırdamasını kaldıramaz.

Dikkat edin ama, daha sıradan mesafelere geldiğimizde (Şekil 5.1' deki çizim sıralamasına tersinden baktığımızda), küçük ölçekteki rasgele, şiddetli dalgalanmalar birbirini ortadan kaldırır -ortalamada, şu bizim durmadan borçlanan tipin banka hesabında borçlanma eğiliminden bir iz görülmemesinde olduğu gibi- evrenin dokusuyla ilgili olarak düz, pürtüksüz geometri kavramı bir kez daha geçerlilik kazanır. Bu durum, nokta vuruşlu yazıcıdan çıktı alınmış bir tabloya

baktığınızda yaşadığınız şeye benzer: Uzaktan bakıldığında tabloyu oluşturan noktalar kaynaşır ve düz bir imge izlenimi yaratır, bu imgenin varyasyonları tablonun bir bölgesinden diğerine kesintisiz biçimde hafifçe değişmektedir. Fakat tabloyu daha küçük mesafe ölçeklerinde incelediğinizde, uzak mesafeden verdiği düz görüntüden çok daha farklı olduğunu görürsünüz. Her biri diğerlerinden çok ayrı noktaların bir toplamından ibarettir tablo. Fakat unutmayın, tablonun böyle farklı bir niteliğe sahip olduğunu, ancak onu çok küçük ölçeklerde incelediğinizde fark edersiniz; uzaktan düz görünür. Keza uzay-zamanın dokusu da, ultramikroskobik kesinlikle incelendiği zamanlar dışında düz, pürüzsüz görünür. Genel göreliliğin yeterince büyük mesafe (ve zaman) ölçeklerinde -birçok tipik astronomik uygulamayla ilgili ölçekler- geçerli olmasına karşın, kısa mesafe (ve zaman) ölçeklerinde bozulmasının sebebi de budur. Kuramın temel direği (düz ve yumuşak bir biçimde kıvrılan bu geometri), büyük olan açısından geçerlidir, fakat küçüğe doğru gidildikçe kuantum değişimleri yüzünden bozulur.

Genel görelilik ve kuantum mekaniğinin temel ilkeleri, Şekil 5.1'deki tehlikeli olgunun görünürlük kazanması için, altında kalınması gereken yaklaşık mesafe ölçeklerini hesaplamamızı mümkün kılıyor. Planck sabitinin küçüklüğü -kuantum etkilerinin gücünü yönlendirir- ve kütleçekimi kuvvetinin içkin zayıflığı bir araya gelerek Planck uzunluğu denen bir sonucayol açar ki bu uzunluk tahayyül edilemeyecek kadar küçüktür: Bir santimetrenin milyarda birinin milyarda birinin milyarda birinin milyonda biri kadardır (10^{-33} santimetredir). Şekil 5.1' de ki beşinci düzey de, evrenimizin ultramikroskobik, Planck uzunluğu altı ölçeklerdeki manzarasını resmetmektedir. Bir ölçek duygusu kazanalım: Bir atomu bilinen evren boyutunda büyütecek olsaydık, Planck uzunluğu ortalama bir ağacın uzunluğuna ancak eşit olurdu.

Böylece genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki uyumsuzluğun ancak ve ancak evrenin gizli bir alanında biraz görünürlük kazandığını görüyoruz. Bu yüzden de kaygılanmaya değer mi acaba diye sorabilirsiniz. Aslına bakarsanız, fizik camiası bu meselede ağız birliği sergilemiyor. Sorunu ele almak isteyen, ama

tipik uzunlukların Planck uzunluğunu hayli aştığı problemlerde, ama araştırmalarının gerektirdiği biçimde, kuantum mekaniğini ve genel göreliliği kullanmaktan menınun olan fizikçiler var. Gelgelelim başka bazı fizikçiler de var ki, bildiğimiz haliyle fiziğin iki temel kaidesinin özleri itibarıyla temelde uyumsuz olduğu gerçeğinden, ki bu sorunu ortaya koymak için ultramikroskobik mesafelerin incelenmesinin gerekmesinden bağımsız olarak, derin bir rahatsızlık duyuyorlar. Bu fizikçiler, iki kuram arasındaki uyuşmazlığın fiziksel evreni kavrayışımızda temel bir kusura işaret ettiğini savunuyor. Bu görüş, evrenin en derin, en temel düzeyde anlaşılırsa eğer, uyumlu bir birliktelik sergileyen parçalardan oluşan, mantıken sağlam bir kuramla betimlenebileceğini ortaya koyan, kanıtlanamayan fakat derinden hissedilen bir düşünceye dayanıyor. Birçok fizikçiyse, bahsettiğimiz uyuşmazlığın, araştırmaları açısından ne kadar temel önemde olduğu bir tarafa, temelde, evrene dair en derin kuramsal anlayışımızın, güçlü, fakat birbiriyle çatışan iki açıklama çerçevesinin matematiksel açıdan tutarsız bir biçimde harmanlamasından oluşmasına inanmakta zorlanıyor.

Fizikçiler, gerek genel görelilik kuramını gerek kuantum mekaniğini, çelişmeyi engelleyecek şekilde değiştirmek için sayılamayacak kadar çok girişimde bulunmuştur, fakat bu girişimler genelde cesur ve dâhiyane girişimler olsalar da başarısızlık üstüne başarısızlıkla sonuçlanmıştır.

Evet, durum böyleydi, ta ki süpersicim kuramının keşfine dek.

VI. Bölüm

Müzik Bu: Süpersicim Kuramının Esasları

Müzik öteden beri, kozmik bir ilgiyi yansıtan konulara kafa yoranların tercih ettiği metaforları besleyen bir kaynak olmuştur. Eskiçağa ait Pythagorasçı "kürelerin müziğinden", asırlardır araştırmalara kılavuzluk etmiş "doğanın armonilerine" dek, gök cisimlerinin hareketlerinde, atomaltı parçacıkların isyankâr patlamalarında hep beraber doğanın şarkısını aradık. Süpersicim kuramının keşfiyle birlikte müzikle ilgili metaforlar da çarpıcı bir gerçeklik kazanmış oldu, çünkü bu kuram mikro seviyedeki manzaranın küçük tellerden oluştuğunu, bu tellerin titreşim örüntülerinin kozmosun evrimini yönettiğini öne sürer. Yani süpersicim kuramına göre değişim rüzgârları zaten rüzgârlı bir evrende esmektedir.

Standart model ise bunun tersine evrenin temel bileşenlerini, hiçbir iç yapısı olmayan nokta benzeri bileşenler olarak görür.

Bu yaklaşım ne kadar güçlü olsa da (daha önce de belirttiğimiz gibi, standart modele göre mikrodünya hakkında yapılan tüm tahminler esasen bugünkü teknolojik sınırımız olan metrenin milyarda birinin milyarda biri ölçeğinde doğrulanmıştır), standart model kütleçekimini içermediği için eksiksiz ya da nihai bir kuram olamaz. Dahası, kütleçekimini kuantum mekaniği çerçevesine oturtma girişimleri, ultramikroskobik mesafelerde -yani Planck uzunluğundan daha kısa mesafelerde- uzamsal dokuda gözlenen şiddetli dalgalanmalar yüzünden başarısızlığa uğramıştır. Çözülemeyen bu problem, doğa hakkında daha derin bir anlayışa ulaşma arayışını başlatmıştır. 1984'te, o dönemde Queen Mary College'da çalışmakta olan Michael Green ile California Teknoloji Enstitüsü'nden John Schwarz, süpersicim kuramının (ya da kısaca sicim kuramının) bu anlayışı pekâlâ sunabileceği yönünde ikna edici ilk kanıtı ortaya koymuştur.

Sicim kuramı, evrenin ultramikroskobik özelliklerine ilişkin kuramsal tanımımıza yeni ve köklü bir değişiklik getirir. Fizikçiler zaman içinde bu değişikliğin Einstein'ın genel görelilik kuramını, kuantum mekaniğinin yasalarına tam da gerektiği biçimde ve tümüyle uyumlu kılacak şekilde değiştirdiğini fark etmiştir. Sicim kuramına göre, evrenin temel bileşenleri nokta parçacıklar *değildir.* Aksine küçücük, tek boyutlu iplikçiklerdir, çok çok ince lastik bantlar gibi ileri geri titreşip dururlar. Fakat kuramın ismi sizi yanıltmasın: Kendisi de moleküllerden ve atomlardan oluşan sıradan bir sicim parçasının tersine, sicim kuramındaki sicimlerin maddenin tam kalbinde olduğu düşünülmelidir. Kuram, *sicimlerin* atomları oluşturan parçacıkları oluşturan ultramikroskobik parçacıklar olduğunu ileri sürer. Sicim kuramının sicimleri o kadar küçüktür ki -ortalama uzunlukları ancak Planck uzunluğu kadardır- en güçlü cihazlarımızla bile incelendiklerinde nokta benzeri *görünürler.*

Fakat her şeyin temel bileşeni olarak nokta parçacıkların yerine iplikçiklerin geçirilmesinin son derece önemli sonuçları olmuştur. Bir kere öyle görünüyor ki, sicim kuramı genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki çatışmayı çözmektedir. Birazdan göreceğimiz üzere, bir sicimin boyutunun olması iki kuramı da birleştiren tek bir uyumlu çerçeve düşünmeyi mümkün kılan ve hayati önem taşıyan yeni bir unsurdur, İkincisi, bütün maddenin ve bütün kuvvetlerin tek bir temel bileşenden, salınan sicimlerden oluştuğunu ileri süren sicim kuramı gerçekten de birleşik bir kuram ortaya koyar. Son olarak sonraki bölümlerde daha ayrıntılı olarak tartışıldığı üzere, bu dikkat çekici başarılarının yanı sıra, sicim kuramı uzay-zaman kavrayışımızı bir kez daha kökten değiştirir.

Sicim Kuramının Tarihçesi

1968'de Gabriele Veneziano adında genç bir kuramsal fizikçi, güçlü nükleer kuvvetin deneysel olarak gözlenmiş çeşitli özelliklerini anlamaya çalışıyordu. O dönemde, İsviçre'nin Cenevre kentindeki parçacık hızlandırma laboratuvarı CERN'de bir araştırma bursuyla bulunan Veneziano, bu sorunun çeşitli yönleri üzerinde birkaç yıl çalıştı ve nihayet bir gün çarpıcı bir keşifte bulundu. Ünlü isviçreli

matematikçi Leonhard Euler'in yaklaşık 200 yıl önce tümüyle matematiksel heveslerle geliştirdiği ezoterik bir formül (yaygın deyişle Euler'in beta-fonksiyonu) kuvvetli bir etkileşim içinde olan parçacıkların birçok özelliğini bir çırpıda beti mley i veriyormuş gibi görünüyordu. Veneziano'nun bu gözlemi, güçlü kuvvetin birçok özelliği için sağlam bir matematiksel çerçeve sunuyordu; böylece Euler'in beta-fonksiyonunu kullanmayı amaçlayan yoğun bir araştırma furyasıyla birlikte, dünyanın dört bir köşesindeki çeşitli atom çarpıştırma laboratuvarlarından gelen veri yığınını betimleyen çeşitli genellemeler yapılmaya başlandı. Yine de Veneziano'nun gözlemi bir anlamda eksikti. Öğrencilerin formülleri ne anlama geldiklerini ya da nasıl kanıtlandıklarını bilmeksizin kullanması gibi, Euler'in beta-fonksiyonu da işe yarıyor gibi görünüyordu, ama kimse bunun nasıl olduğunu bilmiyordu. Açıklamasını arayan bir formüldü bu. 1970'te bu durum değişti; Chicago Üniversitesinden Yoichiro Nambu, Niels Bohr Enstitüsü'nden Holger Nielsen ve Stanford Üniversitesinden Leonard Susskind'in yaptığı çalışmalar Euler'in formülünün gerisinde saklı duran, o zamana dek bilinmeyen fiziği ortaya koydu. Bu fizikçiler, eğer temel parçacıklar küçük, titreşen, tek boyutlu sicimler olarak ele alınırlarsa, parçacıklar arasındaki nükleer etkileşimlerin Euler'in fonksiyonuyla tam olarak betimlenebileceğini gösterdi. Sicim parçacıklarının çok küçük olmaları halinde yine nokta benzeri parçacıklar gibi görüneceklerini, dolayısıyla da bu durumun deneysel gözlemlerle uyumlu olacağını düşünmüşlerdi.

Bu çalışma sezgisel bakımdan sade bir kuram ortaya koyuyor olsa da, çok geçmeden güçlü kuvveti sicimlerle betimlemenin başarısız olacağı gösterildi. 197O'lerin başlarında atomaltı dünyayı daha derinden inceleme kapasitesine sahip yüksek enerjili deneyler, sicim modelinin gözlemlerle doğrudan çelişen bazı tahminlerde bulunduğunu gösterdi. Aynı zamanda, kuantum kromodinamiğinin nokta parçacık kuantum alan kuramı da geliştiriliyordu; bu kuramın güçlü kuvveti tanımlamaktaki ezici başarısı sicim kuramının bir kenara bırakılmasına yol açtı.

Parçacık fizikçilerinin çoğu, sicim kuramının bilimin çöplüğüne gönderildiği görüşündeydi, ama kararlı birkaç fizikçi kurama sadık

kaldı. Örneğin Schwarz "Sicim kuramının matematiksel yapısı o kadar güzel ki, o kadar fazla mucizevi özelliği var ki, derinlerde bir şeye işaret ediyor olsa gerek." diye düşünmüştü. Fizikçilerin sicim kuramında gördüğü sorunlardan biri, başına bela açacak kadar "zengin" görünmesiydi. Kuram, glüonun özelliklerine çok benzer özelliklere sahip titreşen sicim konfigürasyonları içeriyordu, bu da güçlü kuvvete ilişkin bir kuram olduğu yönündeki ilk iddiayı destekliyordu. Fakat bunun dışında, güçlü kuvvete ilişkin deneysel gözlemlerle hiç ilgisi yokmuş gibi görünen, haberci benzeri *başka* parçacıklar da içeriyordu. 1974'te Schwarz ve Ecole Normale Superieure'den Joel Scherk görünürdeki bu kusuru bir meziyete çevirme yönünde önemli bir adım attı. Sicimlerin titreşimindeki haberci benzeri kafa karıştırıcı örüntüleri inceledikten sonra, bunların özelliklerinin, kütleçekimi kuvvetine ait olduğu varsayılan haberci parçacığın yani gravitonun özellikleriyle mükemmel bir uyum içinde olduğunu fark ettiler. Kütle çekimi kuvvetinin bu "en küçük demetleri" henüz hiç görülmemiş olsa da, kuramcılar bunların sahip olması gereken bazı temel özelliklere dair güvenilir tahminlerde bulunabilir; Scherk ve Schwarz da bu özelliklerin bazı titreşim örüntüleriyle gerçekleştiğini bulmuştu. Buna dayanarak, fizikçilerin sicim kuramının kapsamını çok sınırlı tutması yüzünden kuramın ilk seferde başarısız olduğu iddiasında bulundular. Sicim kuramının yalnızca güçlü kuvvete ilişkin bir kuram olmadığını, kütleçekimini de içeren bir kuantum kuramı olduğunu öne sürüyorlardı.

Fizik camiasının bu iddiayı büyük bir hevesle karşıladığı söylenemez. Aslına bakarsanız, Schwarz "Çalışmamız herkes tarafından görmezden gelindi." diyor. İlerledikleri yol, kütleçekimini ve kuantum mekaniğini birleştirmeyi deneyip başarısız olmuş çok sayıda girişimle doluydu. Sicim kuramının, güçlü kuvveti tanımlama yönündeki ilk girişiminin yanlış olduğu gösterilmişti; birçoklarına göre de, bu kuramı daha büyük bir amaç için kullanmak anlamsızdı. 1970'lerin sonunda ve 1980'lerin başında yapılan sonraki çalışmaların, sicim kuramı ile kuantum mekaniğinin de kendi içlerinde kolayca fark edilmeyen çelişkiler olduğunu göstermesi daha dayıkıcı oldu. Öyle görünüyordu ki, kütleçekimi kuvveti, evrenin

mikro düzeyde betimlenmesinin bir parçası haline getirilme çabalarına bir kez daha direniyordu.

1984'e kadar durum buydu. 1984'te Green ve Schwarz, çoğu fizikçinin büyük ölçüde görmezden geldiği, genellikle de elinin tersiyle ittiği, on yılı aşkın bir süredir devam eden yoğun bir araştırmanın sonucunda yazdıkları, dönüm noktası niteliğindeki bir makalede sicim kuramının kuantum kuramıyla çelişmesinin çözülebileceğini ortaya koydular. Dahası, sonuçta ortaya çıkan kuramın dört kuvvetin dördünü ve bütün maddeyi kapsayacak kadar geniş olduğunu da gösteriyorlardı. Green ve Schwarz'ın vardığı bu sonuç fizik camiasında yayıldıkça, yüzlerce parçacık fizikçisi ellerindeki araştırma projelerini bir kenara bırakıp evrenin derinlerdeki işleyişini anlama yolundaki çok eskilerden beri süregelen arayışın, görünüşe bakılırsa son kuramsal savaş meydanına girdiler.

Lisansüstü çalışmalarıma Ekim 1984'te Oxford Üniversitesi'nde başladım. Kuantum alan kuramı, ayar kuramı ve genel görelilik gibi konuları öğrenmekten heyecan duyuyor olsam da, benden büyük lisansüstü öğrencileri arasında parçacık fiziğinin pek gelecek vaat etmediği yönünde bir kanı yaygındı. Standart model geçerliliğini koruyordu, deneylerin sonuçlarını tahmin etme yönündeki gözle görülür başarısı da, modelin doğrulanmasının yalnızca bir zaman ve ayrıntı meselesi olduğunu gösteriyordu. Bu modelin sınırlarının ötesine geçip kütleçekimini de ona dahil etmek ve modelin dayandığı deneysel girdileri -temel parçacıkların kütlelerini, kuvvet yüklerini, kuvvetlerinin göreli gücünü özetleyen, deneyler sonucu elde edilmiş ama kuramsal olarak anlaşılamamış on dokuz rakam- *belki* açıklayabilecek olmak o kadar göz korkutucu bir işti ki, en cesurları hariç bütün fizikçiler bu zorluk karşısında geri çekiliyordu. Fakat altı ay sonra, bu durum tümüyle değişmişti. Green ile Schwarz'ın başarısı nihayet lisansüstü eğitimlerinin daha ilk yılındaki öğrencilere bile ulaşmış, önceki bezginlik yerini heyecan verici bir duyguya, fizik tarihinde çok önemli bir anın içinde olma duygusuna bırakmıştı. Bazılarımız, sicim kuramını anlamak için gerekli olan soyut matematik ve kuramsal fizik konularına hâkim olabilmek için gece yarılarına dek çalıştık.

1984'ten 1986'ya kadarki dönem "ilk süpersicim devrimi" olarak bilinir. O üç yıl içinde dünyanın dört bir yanındaki fizikçiler, sicim kuramı üzerine bini aşkın araştırma kaleme aldı. Bu çalışmalar standart modelin çok sayıda özelliğinin -yıllar süren araştırmalarla, kılı kırkyaran titiz çalışmalarla keşfedilmiş özellikler- sicim kuramının ortaya koyduğu büyük yapıdan *doğal olarak çıktığını* kuşkuya yer bırakmayacak şekilde gösteriyordu. Michael Green'in de dediği gibi "Sicim kuramıyla karşılaşıp son yüzyıl içinde fizikte kaydedilen büyük gelişmelerin neredeyse hepsinin böyle basit bir başlangıç noktasından doğduğunu -hem de büyük bir zarafetle doğduğunu- anladığınızda, bu inanılmaz derecede ikna edici kuramın kendi başına bir sınıf oluşturduğunu da anlarsınız." Dahası birazdan tartışacağımız üzere, sicim kuramı bu özelliklerin birçoğuna standart modelden daha eksiksiz ve tatmin edici bir açıklama getirir. Bu gelişmeler birçok fizikçiyi, sicim kuramının nihai birleşik kuram olma vaadini tutma yolunda olduğuna ikna etmiştir.

Yine de sicim kuramcıları, tekrar tekrar çalışmalarına sekte vuran önemli bir engelle karşılaştı. Kuramsal fizik araştırmalarında anlaşılamayacak ya da analiz edilemeyecek kadar zor denklemlerle sık sık karşı karşıya kalınır. Genelde fizikçiler vazgeçmez ve denklemleri yaklaşık olarak çözmeye çalışır. Sicim kuramındaysa durum çok daha zordur. *Denklemlerin kendilerini* belirlemek bile o kadar zor olmuştur ki, şu ana dek denklemlerin yalnızcayaklaşık versiyonları çıkarılabilmiştir. Bu yüzden de sicim kuramcıları yaklaşık denklemlere yaklaşık çözümler bulmakla sınırlanmıştır. İlk süpersicim devrimi sırasında, birkaç yıl boyunca kaydedilen ciddi ilerlemeler sonrasında, fizikçiler kullanılan yaklaşık değerlerin o konuda daha da ilerlemenin yolunu kapayan birçok temel soruyu cevaplamakta yetersiz olduğunu gördü. Sicim kuramı üzerine çalışan, yaklaşık yöntemlerin ötesine geçme yolunda somut önerileri olmayan fizikçilerin birçoğu hayal kırıklığına uğrayıp daha önceki araştırmalarına döndü. Geri kalanlar için 1980'ler ve 1990'ların başı zorlu dönemler oldu. Bir kasaya kapatılmış, yalnızca ufak ve ümitleri boşa çıkaran bir delikten görülebilen altın bir hazine gibi, sicim kuramının güzelliği ve vaat ettikleri de insanı kendine çağırıyordu, ama kimsede kuramın gücünü ortaya çıkaracak araçlar yoktu. Uzun

süren verimsiz kriz dönemleri önemli keşlilerle kesintilere uğruyordu, ama önceki yaklaşıklıkların ötesine geçme gücüne sahip yeni yöntemler gerektiğini bu alanda çalışıldığını herkes açıkça görüyordu.

Sonra, Güney California Üniversitesinde düzenlenen Sicim 1995 konferansında, dünyanın önde gelen fizikçilerinin tıka basa doldurduğu bir salonda çok heyecan verici bir konferans veren Edward Witten, bir sonraki adımla ilgili bir planı olduğunu açıkladı ve böylece "ikinci süpersicim devrimi" başladı. Bu satırlar yazıldığı sırada, sicim kuramcıları önceden karşı karşıya kalman kuramsal engellerin aşılmasını sağlayacağı düşünülen bir dizi yeni yöntemi netleştirme yolunda canla başla çalışıyordu. Bu yolda karşılaşılacak zorluklar, süpersicim kuramcılarının teknik gücünü çok ciddi bir sınava tabi tutacak; fakat tünelin sonundaki ışık her ne kadar hâlâ uzak olsa da, nihayet görünürlük kazanıyor olabilir.

Bu bölümde ve bundan sonraki birkaç bölümde, ilk süpersicim devriminden sonra ve ikinci süpersicim devriminden önce yapılan çalışmalardan doğan sicim kuramı kavrayışını betimleyeceğiz. Zaman zaman ikinci süpersicim devriminden doğan yeni kavrayışların altını çizeceğiz, ama bu daha yeni gelişmeleri kapsamlı olarak XII. ve XIII. Bölüm'de tartışacağız.

Yine mi Yunanlıların Atomları?

Bu bölümün başında belirttiğimiz, ayrıca Şekil 1.1'de de gösterdiğimiz gibi sicim kuramı, eğer standart modeldeki varsayılan nokta parçacıklar bugünkü teknolojik kapasitemizin çok ötesinde bir kesinlikle incelenebilirse, bu parçacıkların her birinin salınım halinde, çok küçük birer sicimden oluştuğunun görüleceğini iddia eder.

Daha sonra açıklık kazanacak sebeplerden ötürü, tipik bir sicimin uzunluğu yaklaşık olarak Planck uzunluğuna eşittir, yani bir sicim bir atomun çekirdeğinden yüz milyar kere milyar (10") defa küçüktür. Günümüzde yapılan deneylerin, maddenin mikro seviyede sicimlere dayalı doğasını çözemiyor olmasında şaşıracak bir şey yok: Sicimler,

atomaltı parçacıklar ölçeğinde bile çok ama çok küçüktür. Bir sicimin bir nokta parçacık olmadığını doğrudan gösterebilmek için, maddeleri bugüne dek yapılmış olanlardan milyon kere milyar kat daha yüksek bir enerjiyle çarpıştıracak bir hızlandırıcımız olması gerekir.

Nokta parçacıklar yerine sicimleri geçirmenin ne gibi şaşırtıcı sonuçlar doğurduğunu kısaca anlatacağız, ama önce daha temel bir soruyu ele alalım: Sicimler neden yapılmıştır?

Bu sorunun iki olası cevabı var: İlki, sicimler gerçekten de temeldir, tam da Eski Yunanlıların kastettiği anlamda *parçalanamaz bileşenler y Ani* "atomlar"dır. Her şeyin mutlak en küçük bileşeni olduklarından, mikrodünyanın altyapısındaki çok sayıda katmanın sonuncusunu -Rusların matruşka bebeklerinin sonuncusunu- temsil ederler. Bu bakış açısına göre, sicimlerin bir boyutu olsa da, neden oluştukları sorusunun bir anlamı yoktur. Sicimler daha küçük bir şeyden oluşuyor olsalardı, temel olmazlardı. O zaman, sicimleri oluşturan her neyse derhal sicimlerin yerini alır ve evrenin daha da temel bileşeni olduğu iddiasında bulunurdu. Dilbilimsel benzetmemizi kullanalım: Paragraflar cümlelerden oluşur, cümleler kelimelerden, kelimeler de harflerden. Peki bir harf neden oluşur? Dilbilimsel bir bakış açısına göre, bu nokta yolun sonudur. Harf, harftir; yazılı dilin yapıtaşıdır, onların altında başka bir yapı daha yoktur. Harflerin bileşenlerini sorgulamanın bir anlamı yoktur. Aynı şekilde bir sicim de bir sicimdir; ondan daha temel bir şey olmadığı için başka bir maddeden oluşuyor diye betimlenemez.

Bu ilk cevaptır. İkinci cevap, sicim kuramının doğaya dair doğru ve nihai bir kuram olup olmadığını henüz bilmediğimiz gerçeğine dayanır. Sicim kuramı gerçekten de hedeften uzaksa, o halde sicimleri de, sicimlerin bileşimiyle ilgili soruları da pekâlâ unutabiliriz. Bu bir ihtimal, ama 1980'lerin ortalarından bu yanayapılan araştırmalar ciddi bir çoğunlukla bunun pek de ihtimal dahili olmadığına işaret ediyor. Fakat tarih bize evren anlayışımızın derinleştiği her sefer, maddenin daha da alt bir düzeyini oluşturan, daha da küçük mikro bileşenler olduğunu göstermiştir. Sicim

kuramının nihai kuram olamaması halinde, diğer bir olasılık sicimlerin nihai katman olmaması, ama kozmik soğanın Planck uzunluğu ölçeğinde görünürlük kazanan bir katmanı olması olasılığıdır. Bu durumda sicimler daha da küçük parçacıklardan oluşuyor olabilir. Sicim kuramcıları bu olasılığı gündeme getirmişler ve bu konuda çalışmaya devam etmektedirler. Bugüne dek, kuramsal çalışmalar sicimlerin de altında başka bir yapı olabileceğine dair ilginç ipuçları vermiştir, fakat henüz kesin bir kanıt yoktur. Bu soruyla ilgili son sözü ancak zaman ve yoğun araştırmalar söyleyecektir.

XII. ve XV. Bölüm'de yer verdiğimiz birkaç tahmin dışında, buradaki tartışmamız açısından sicimleri, ilk cevapta önerilen yaklaşımla yani doğanın en temel bileşenleri olarak ele alacağız.

Sicim Kuramıyla Gelen Birleşme

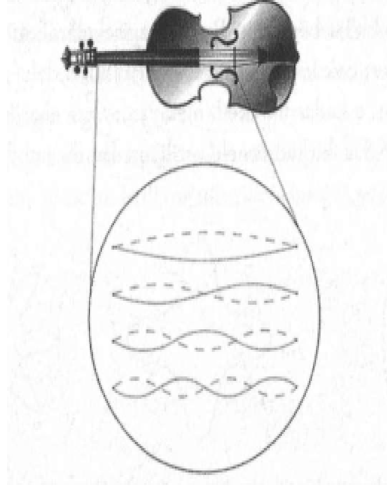
Standart modelin kütleçekimi kuvvetini kapsayamamak dışında, başka bir yetersizliği daha vardır: Yapısının ayrıntılarına dair bir açıklama yoktur. Doğa neden, önceki bölümlerde özetlenen ve Tablo 1.1 ve 1.2'de gösterilen belli parçacıkları ve kuvvetleri seçmiştir? Bu bileşenleri tanımlayan 19 parametre, neden sahip oldukları nicel değerlere sahiptir? Sayılarının ve ayrıntılı özelliklerinin fazlasıyla keyfi göründüğü hissine kapılmamak elde değil. Bu görünüşte rasgele bileşenlerin gerisinde yatan daha derin bir anlayış var mı, yoksa evrenin ayrıntılı fiziksel özellikleri tesadüfen mi "seçilmiş"?

Standart modelin kendisinin bir açıklama sunması mümkün değil, çünkü parçacıkları ve bu parçacıkların özelliklerini deneysel olarak ölçülmüş birer *girdi* olarak kabul eder. Tıpkı elde başlangıç yatırımlarınıza ilişkin veri girdisi yoksa, borsanın performansının portföyünüzün değerini belirlemekte kullanılamayacağı gibi, standart model de -temel parçacık özelliklerine dair veri girdisi yoksa- tahmin yapmakta kullanılamaz. Kuramcılar ancak deneyleri yürüten parçacık fizikçilerinin kılı kırk yararak bu verileri ölçmesi sonrasında, sınanabilir tahminlerde bulunmak için -örneğin parçacıklar bir hızlandırıcıda çarpıştırıldığında neler olacağı gibi- standart modeli

kullanabilir. Fakat bugünkü Down Tones ortalaması on yıl önce borsada yaptığınız başlangıç yatırımınızı ne kadar açıklayabilirse, standart model de Tablo 1.1 ve 1.2'deki temel parçacık .özelliklerini o kadar açıklayabilir.

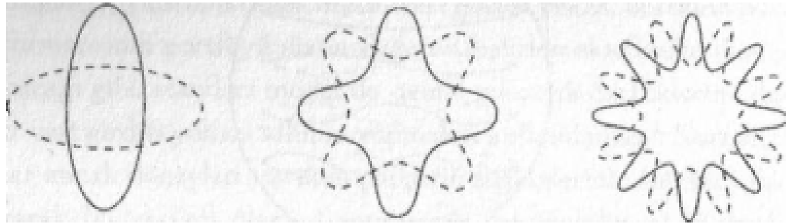
Aslına bakarsanız, eğer deneyler mikrodünyada, muhtemelen farklı kuvvetlerle etkileşim halinde olan, farklı bir parçacık içeriği olduğunu göstermiş olsaydı, kurama farklı girdi parametreleri ekleyerek bu değişiklikleri standart modele dahil etmek gayet kolay olurdu. Bu anlamda, standart modelin yapısı temel parçacıkların özelliklerini açıklayamayacak kadar esnektir, çünkü bir dizi olasılığa açıktır.

Sicim kuramı çok farklıdır. Benzersiz ve esnek olmayan kuramsal bir yapıdır. Aşağıda açıklandığı gibi, ölçümlerde nirengi noktası olarak alınacak ölçeği belirleyen tek bir rakam dışında bir girdi gerektirmez. Mikrodünyanın bütün özellikleri, kuramın açıklama gücünün dahilindedir. Bunu anlayabilmek için isterseniz önce daha bildik sicimleri -örneğin keman tellerini- düşünelim. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi, tellerin her biri *rezonans* diye bilinen, çok çeşitli (aslında sonsuz sayıda) titreşim örüntüsü oluşturabilir. Rezonanslar, tepe noktaları ve çukur noktaları arasındaki mesafeler eşit olan ve telin sabit iki ucu arasına tam olarak oturan dalga örüntüleridir. Kulaklarımız bu farklı titreşimli salınım örüntülerini, farklı notalar olarak algılar. Sicim kuramındaki sicimler de benzer özellliklere sahiptir. Sicimlerin, boyutlarına tam olarak oturan ve tepe noktaları ve çukur noktaları arasındaki mesafenin eşit olması sayesinde destekleyebildikleri titreşimli salınım örüntüleri vardır. Şekil 6.2'de bazı örnekler gösterilmektedir. İşte asıl önemli nokta: Bir keman telinin oluşturduğu farklı titreşim örüntülerinin farklı notalar oluşturması gibi, temel bir sicimdeki farklı titreşim örüntüleri de farklı kütleler ve kuvvet yükleri oluşturur. Bu çok önemli bir nokta olduğundan, bir kere daha söyleyelim. Sicim kuramına göre, temel bir "parçacığın" özellikleri -kütlesi ve farklı kuvvet yükleri- içteki sicimin gerçekleştirdiği titreşim örüntüsüyle belirlenir.



Şekil 6.1 Bir kemanın telleri, bütün tepe noktalan ve çukur noktaları keman telinin iki ucu arasına tam olarak oturan salınım örüntüleri sergileyerek titreşebilir.

Bu ilişki en kolay, bir parçacığın kütlesi açısından anlaşılır. Bir sicimdeki belirli bir titreşim örüntüsünün enerjisi, örüntünün genliğine -tepe noktaları ve çukur noktaları arasındaki maksimum yer değiştirmeye- ve dalga boyuna -yani bir tepe noktasıyla bir sonraki tepe noktası arasındaki mesafeye- bağlıdır. Genlik ne kadar büyükse ve dalga boyu da ne kadar kısaysa, enerji o kadar büyüktür. Bu da sezgisel olarak umulacak şeyi yansıtıyor; çok hareketli titreşim örüntüleri daha fazla enerjiye sahiptir, o kadar hareketli olmayanlarınsa enerjisi daha azdır. Şekil 6.3'te birkaç örnek veriliyor. Bu da tanıdık bir şey:



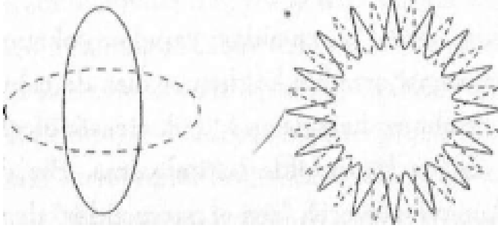
Şekil 6.2 Sicim kuramındaki ilmekler -keman tellerinde olduğu gibi- bütün tepe noktaları ve çukur noktalan sicimlerin boyutuna oturan salınım örüntüleri sergileyerek titreşebilir.

Daha kuvvetli çekilen keman telleri daha şiddetli titreşir, daha hafifçe çekilen tellerse daha hafif titreşir. Şimdi özel göreliliğin bakış açısına göre, enerji ile kütlenin madalyonun iki yüzü olduğunu biliyoruz: Daha fazla enerji daha büyük kütle demektir, daha büyük kütle de daha fazla enerji. Dolayısıyla sicim kuramına göre, bir temel parçacığın *kütlesi,* içindeki sicimin titreşim örüntüsünün *enerjisi* tarafından belirlenir. Daha ağır parçacıkların daha fazla enerjiyle titreşen iç sicimleri vardır, hafif parçacıklarınsa daha az enerjiyle titreşen iç sicimleri vardır.

Bir parçacığın kütlesi onun kütle çekimsel özelliklerini belirlediğinden, sicimin titreşim örüntüsü ile bir parçacığın kütleçekimi kuvvetine verdiği karşılık arasında doğrudan bir ilişki olduğunu görüyoruz. Buradaki akıl yürütme biraz daha soyut olsa da, fizikçiler bir sicimin titreşim örüntüsünün diğer ayrıntılı yönleri ile başka kuvvetler karşısındaki özellikleri arasında benzer bir eşleşme olduğunu bulmuştur. Örneğin belli bir sicimin taşıdığı elektrik yükü, zayıf yük ve güçlü yük, bu sicimlerin tam olarak nasıl titreştiğiyle belirlenir. Dahası, haberci parçacıklar için de tamamen aynı fikir geçerlidir. Fotonlar, zayıf ayar bozonları ve glüonlar gibi parçacıklar da başka sicim titreşim örüntüleridir. Özellikle önemli bir nokta var: Sicim titreşim örüntüleri arasından bir tanesi, gravitonun özelliklerine tamamen uyar ve bu da kütleçekiminin sicim kuramının ayrılmaz bir parçası olmasını sağlar.

Böylece sicim kuramına göre her temel parçacığın gözlenen özelliklerinin, iç sicimi belli bir titreşim örüntüsü gösterdiği için ortaya çıktığını anlıyoruz. Bu bakış açısı, fizikçilerin sicim kuramının keşfedilmesinden önce benimsediği bakış açısından hayli farklıdır. Daha önceki bakış açısına göre, temel parçacıklar arasındaki farklılıklar, aslında her bir parçacık türünün "farklı bir kumaştan kesildiği" söylenerek açıklanıyordu. Her parçacık temel olarak görülse de, her birinin oluştuğu "malzemenin" farklı olduğu düşünülüyordu. Örneğin elektron "malzemesi" negatif elektrik yüklüydü, nötrino "malzemesi" ise elektrik yüküne sahip değildi. Sicim kuramı, bütün maddenin ve bütün kuvvetlerin "malzemesinin" aynı olduğunu söyleyerek bu tabloyu kökten değiştirir. Her temel

parçacık tek bir sicimden oluşur -yani her parçacık tek bir sicimdir- ve bütün sicimler de kesinlikle birbirinin aynıdır. Parçacıklar arasındaki farklılıklar, sicimlerinin farklı titreşim örüntüleri göstermesinden doğar. Farklı temel parçacıklar olarak görünen şeyler aslında temel bir sicimin çıkardığı farklı "notalardır". Muazzam sayıda böyle titreşen sicimden oluşan evrenin kozmik bir senfoniden farkı yoktur.



Şekil 6.3 Daha hareketli titreşim örüntülerinin enerjisi, o kadar hareketli olmayan örüntülerin enerjisinden daha fazladır.

Bu genel bakış, sicim kuramının gerçekten de muhteşem bir birleştirici çerçeve sunduğunu gösteriyor. Maddenin her parçacığı ve her kuvvet iletkeni, titreşim örüntüsü o sicimin "parmak izi" olan bir sicimden oluşur. Evrendeki bütün fiziksel olaylar, süreçler ve olgular en temel düzeyde, bu temel maddi bileşenler arasında etkin olan kuvvetlerle betimlenebilir olduğu için, sicim kuramı fiziksel evrene dair her şeyi kapsayan, tek bir birleşik tanımlama yapmayı vaat eder: Her şeyin kuramı.

Sicim Kuramının Müziği

Sicim kuramı, temel parçacıkları yapıdan yoksun olarak gören önceki kavrayışı ortadan kaldırıyor olsa da eski alışkanlıklar kolaycayok olmaz; hele de en küçük mesafe ölçeklerinde bile gerçekliği doğru bir şekilde betimliyorsa. Biz de alandaki yaygın uygulamayı izleyerek "temel parçacıklar" demeyi sürdüreceğiz, ama böyle dediğimizde kast ettiğimiz şey daima "temel parçacıklar olarak görünen, ama aslında titreşen küçük sicim parçaları" olacak. Önceki bölümde, bu tür temel parçacıkların kütlelerinin ve kuvvet yüklerinin, sicimlerinin nasıl titreştiğine bağlı olduğunu ileri sürmüştük. Buradan

şunu anlıyoruz: Temel sicimlerin mümkün olan titreşimli salınım örüntülerini -deyim yerindeyse çalabildikleri "notaları"- tam bir kesinlikle çözebilseydik, temel parçacıkların gözlenen özelliklerini açıklayabilmemiz gerekirdi. Dolayısıyla ilk kez sicim kuramı, doğada gözlenen parçacıkların özelliklerini *açıklamaya* yönelik bir çerçeve oluşturmaktadır.

O halde, bu aşamada bir sicimi "tutmamız" ve mümkün olan titreşimli salınım örüntülerini belirleyebilmek için sicimi çeşitli biçimlerde "çekmemiz" gerekir. Sicim kuramı doğruysa, olası titreşim örüntülerinin tam olarak Tablo 1.1 ve 1.2'deki madde ve kuvvet parçacıklarında gözlenen özelliklere yol açtığını görmemiz gerekir. Tabi ki bir sicim, bu deneyi tam olarak anlattığımız gibi gerçekleştiremeyeceğimiz kadar küçüktür. Ama matematiksel betimlemeleri kullanarak bir sicimi *kuramsal olarak* çekebiliriz. 1980'lerin ortalarında sicim kuramının birçok yandaşı, bunu yapabilmek için gerekli olan matematiksel analizin, evrenin mikro düzeydeki en ayrıntılı bütün özelliklerini açıklamanın eşiğinde olduğunu düşünüyordu. Hatta, bazı ateşli fizikçiler, her şeyin kuramının sonunda keşfedildiğini ilan etti. Fakat on yılı aşkın bir sürede edinilen deneyim, bu düşüncenin yarattığı coşkunun vakitsiz olduğunu gösteriyor. Sicim kuramı her şeyin kuramı olmak için gerekli niteliklere sahip, fakat sicim titreşimleri yelpazesini, deneysel sonuçlarla karşılaştırabilecek kesinlikte elde edebilmemizin önünde hâlâ birçok engel var. Yani halihazırda, evrenimizin Tablo 1.1 ve 1.2'de özetlenen temel özelliklerinin sicim kuramıyla açıklanıp açıklanamayacağını bilmiyoruz. IX. Bölüm'de de tartışacağınîîz gibi, açıkça ortaya koyacağımız bazı varsayımlar doğrultusunda, sicim kuramı parçacıklar ve kuvvetler hakkında bilinen verilerle niceliksel olarak uyumlu özelliklere sahip bir evren ortaya koyabilir, fakat kuramdan ayrıntılı sayısal tahminler çıkarmak bugün için kapasitemizin dışındadır. Bu yüzden de, her ne kadar sicim kuramının çizdiği çerçeve, nokta parçacıklara dayalı standart modelin tersine, parçacıkların ve kuvvetlerin neden sahip oldukları özelliklere sahip olduklarını açıklayabilme *kapasitesine* sahip olsa da, henüz bu açıklamayı çıkartabilmiş değiliz. Fakat dikkat çekici bir nokta var: Sicim kuramı o kadar zengin, o kadar kapsamlıdır ki, en

ayrıntılı özelliklerini henüz belirleyememiş olsak da, sonraki bölümlerde göreceğimiz üzere, kuramdan çıkarsanabilecek çok sayıda yeni fiziksel olguya ilişkin bir kavrayış edinmemiz *mümkün.*

Sonraki bölümlerde, önümüzdeki engellerin durumunu da biraz ayrıntılı olarak tartışacağız, fakat öncelikle bu engelleri genel bir düzeyde anlamaya çalışmak daha öğretici olur. Yaşadığımız dünyadaki sicimlerin çok çeşitli gerilimlere sahip olduğunu biliyoruz. Örneğin bir ayakkabının bağcıkları çoğunlukla bir kemana gerilmiş bir telden daha gevşektir. Öte yandan ayakkabı bağcığı da keman teli de bir piyanonun çelik telleri kadar gergin değildir. Sicim kuramının genel ölçeğini kurabilmesi için gereken bir değer de sicimlerin gerilimidir. Peki ama bu gerilim nasıl belirlenir? Temel bir sicimi çekebilseydik ne kadar gergin olduğunu öğrenebilir, böylece de daha bildik gündelik sicimlerin gerilimleri ölçülürken yaptığımız gibi gerilimini ölçebilirdik. Fakat temel sicimler çok küçük olduğundan buyaklaşım uygulanamaz ve daha dolaylı bir yönteme başvurmak gerekir. Scherk ve Schwarz 1974'te belli bir sicim titreşimi örüntüsünün graviton parçacığı olduğunu ileri sürdüklerinde, böyle dolaylı bir yaklaşım kullanmayı başarmışlar ve böylece sicim kuramının sicimlerindeki gerilime dair tahminlerde bulunabilmişlerdi. Scherk ile Schwarz'ın hesapları, graviton olduğunu ileri sürdükleri sicim, titreşimi örüntüsünün aktardığı kuvvetin gücünün, sicimin gerilimiyle ters orantılı olduğunu ortaya koymuştu. Gravitonun kütleçekimi kuvvetini -ki zayıf bir kuvvettir- aktardığı varsayıldığından, bunun, bin milyar kere milyar kere milyar kere milyar ton (10^{39}) gibi devasa bir gerilim anlamına geldiğini bulmuşlardı; bu gerilim *Planck gerilimi diye* adlandırılır. Dolayısıyla temel sicimler, daha bildik örneklere kıyasla son derece gergindir. Bunun üç önemli sonucu vardır.

Sicimlerin Gergin Olmasının Üç Sonucu

Birincisi bir keman ya da piyano telinin uçları sabitlenmiştir, bu da uzunlukları sabit demektir, fakat temel bir sicimin büyüklüğünü belirleyen böyle sınırlayıcı bir çerçeve yoktur. Sicim kuramındaki ilmeklerin geriliminin çok fazla olması, sicimlerin çok ama çok küçük

olacağı anlamına gelir. Ayrıntılı hesaplamalar Planck gerilimine sahip tipik bir sicimin, daha önce de belirttiğimiz gibi Planck uzunluğunda -10^{33} santimetre- olacağını göstermiştir.

İkincisi, gerilimi çok fazla olduğundan, sicim kurammdaki titreşen bir sicimin enerjisi tipik olarak son derece yüksektir. Bunu anlayabilmek için, bir sicimin gerilimi ne kadar fazlaysa titreşmesini sağlamanın o kadar zor olduğunu bilmemiz gerekir. Örneğin bir keman telini çekip titreşmesini sağlamak, bir piyano telini çekmekten daha kolaydır. Dolayısıyla farklı gerilimlere sahip, tamamen aynı biçimde titreşen iki sicim aynı enerjiye sahip olmayacaktır. Gerilimi fazla olan sicim, gerilimi daha az olan sicimden daha fazla enerjiye sahip olacaktır, çünkü gerilimi fazla olan sicimi harekete geçirmek için daha fazla enerji uygulanması gerekir.

Bu da bize, titreşen bir sicimin enerjisinin iki şeyle belirlendiği gerçeğini hatırlatıyor: Tam olarak nasıl titreştiği (daha hareketli bir örüntü daha yüksek enerjiye karşılık gelir) ve sahip olduğu gerilim (yüksek gerilim yüksek enerjiye karşılık gelir). Başlangıçta bu betimleme, giderek daha hafif titreşim örüntüleri -genlikleri giderek küçülen, daha az sayıda tepe noktası ve çukur noktası olan örüntüler- gösteren bir sicimin enerjisinin giderek azalacağını düşünmenize yol açabilir. Fakat IV. Bölüm'de başka bir bağlamda da gördüğümüz gibi, kuantum mekaniği bize bu mantığın doğru olmadığını söyler. Kuantum mekaniği diğer bütün titreşimler ve dalga benzeri etkiler gibi bu titreşimlerin de ancak ayrı ayrı birimler halinde var olabileceğini söylüyor. Kabaca söyleyecek olursak, örneğin bir depo görevlisinin üzerinde taşımakla görevlendirildiği para, nasıl kullanılan para biriminin *tam sayı* bir katıysa, bir sicimin titreşim örüntüsündeki enerji de minimum bir enerji biriminin tam sayı bir katıdır. Şu nokta önemlidir: Bu minimum enerji birimi, sicimin gerilimiyle doğru orantılıdır (belli bir titreşim örüntüsündeki tepe noktalarının ve çukur noktalarının sayısıyla da doğru orantılıdır), bu birimin tam sayı katı ise titreşim örüntüsünün genliğiyle belirlenir.

Buradaki tartışmamız açısından önemli olan nokta şudur: Minimum enerji birimleri sicimin gerilimiyle orantılı olduğundan, bu

gerilim de çok büyük olduğundan, temel parçacık fiziğinin olağan ölçeklerinde, temel minimum enerjiler de aynı şekilde büyüktür; *Planck enerjisi* olarak bilinen şeyin katlarıdır. Şu bize bir ölçek duygusu verecektir: Einstein'ın ünlü değişim formülü $E=mc^2$*'yi* kullanarak Planck enerjisini kütleye çevirecek olursak, bir protondan yaklaşık on milyar kere milyar (10^{19}) kat daha büyük bir kütleye karşılık gelir. Temel parçacık standartlarında çok büyük olan bu kütle *Planck kütlesi* diye bilinir; yaklaşık olarak bir toz zerreciğinin kütlesine ya da ortalama büyüklükteki bir milyon bakteriden oluşan bir topluluğun kütlesine karşılık gelir. Dolayısıyla, sicim kuramına göre titreşen bir sicimin tipik kütle eşdeğerliği, genelde Planck kütlesinin tam sayı (1, 2, 3*, ...)* bir katıdır. Fizikçiler bu durumu, sicim kuramının "doğal" yani "tipik" enerji ölçeğinin (dolayısıyla da kütle ölçeğinin) Planck ölçeği olduğunu söyleyerek ifade eder.

Bu durum Tablo.1.1 ve 1.2'deki parçacık özelliklerini yeniden üretme hedefiyle doğrudan ilgili olan önemli bir soruyu gündeme getiriyor: Sicim kuramının "doğal" enerji ölçeği bir protonun yaklaşık on milyar kere milyar katıysa, etrafımızdaki dünyayı oluşturan çok daha hafif parçacıklar -elektronlar, kuarklar, fotonlar vs.- nasıl açıklanacak?

Bu sorunun cevabını da kuantum mekaniği verir. Belirsizlik ilkesi, hiçbir şeyin tam anlamıyla hareketsiz olmadığını söyler. Bütün nesneler kuantum çalkalanması yaşar, eğer yaşamasalardı nerede olduklarını, hareket hızlarının ne olduğunu tam bir kesinlikle bilebilirdik; bu da Heisenberg'in ilkesine aykırı olurdu. Bu, sicim kurammdaki sicimler için de geçerlidir. Bir sicim ne kadar durgun görünürse görünsün, her zaman bir miktar kuantum titreşimi gösterecektir. İlk olarak 1970'lerde anlaşıldığı üzere, burada dikkat çekici olan şey, bu kuantum çalkalanmaları ile yukarıda bahsettiğimiz, ayrıca Şekil 6.2'de ve Şekil 6.3'te gösterilen tipteki, daha sezgisel sicim titreşimlerinin birbirlerinin enerjilerini *iptal edebilecek* olmasıdır. Aslına bakarsanız, kuantum mekaniğinin tuhaflığı yüzünden, bir sicimin kuantum çalkalanmasıyla ilişkilendirilen enerji *negatiftir,* bu da titreşen bir sicimin toplam enerji içeriğini kabaca Planck enerjisine eşit bir miktarda *azaltır.* Bu da en

düşük enerjili sicim titreşim örüntülerinin (biraz safça da olsa enerjilerinin hemen hemen Planck enerjisine -yani Planck enerjisinin 1 katı- eşit olmasını beklediğimiz örüntülerin) büyük ölçüde birbirini iptal ettiği, dolayısıyla nispeten düşük bir net enerjiye sahip titreşimlere yol açtığı anlamına gelir; bu net enerjilerin kütle eşdeğerleri Tablo 1.1 ve 1.2'de görülen madde ve kuvvet parçacıklarının kütlelerine yakındır. Dolayısıyla, sicimlerin kuramsal betimlemeleriyle parçacık fiziğinin deneysel olarak erişilebilir dünyası arasında temas kuracak olan da, bu *en düşük* enerjili titreşim örüntüleridir. Önemli bir örnekten bahsedelim: Scherk ve

Schwarz, özelliklerinden ötürü haberci graviton parçacığı olabileceğini düşündükleri titreşim örüntüsünde, enerjilerin birbirini tam olarak iptal ettiğini, bunun da sıfır kütleli bir kütleçekimi kuvveti parçacığı anlamına geldiğini bulmuştur. Gravitondan beklenen de tam budur; kütleçekimi kuvveti ışık hızında aktarılır ve yalnızca kütlesiz parçacıklar bu en yüksek doğrusal hızda hareket edebilir. Fakat düşük enerjili titreşim kombinasyonları kural değil istisnadır. Daha tipik titreşimli bir temel sicim, kütlesi protonun kütlesinden milyar kere milyar daha büyük bir parçacığa karşılık gelir.

Bu durum da, Tablo 1.1 ve 1.2'deki nispeten hafif temel parçacıkların bir anlamda, hareketli sicimlerden oluşan, gümbürdeyen bir okyanusun üzerindeki ince pustan doğması gerektiğini söylüyor. Kütlesi protonun kütlesinin 189 katı olan üst kuark gibi ağır bir parçacık bile bir sicim titreşiminden doğabilir. Ama ancak, sicimin çok yüksek düzeydeki tipik Planck ölçeğindeki enerjisinin, kuantum belirsizliği çalkalanması tarafından iptal edilmesi koşuluyla, üstelik yüz milyon kere milyarda birden daha yüksek bir kesinlik oranıyla. Sanki *The Price is Right'a.* katılmışsınız, Bob Barker elinize on milyar kere milyar dolar tutuşturmuş ve sizden verdiği parayı geriye 189 dolar -ne bir dolar eksik, ne bir dolar fazla- kalacak şekilde harcamanızı (iptal etmek de diyebiliriz) istemiş gibi. Tek tek ürünlerin kesin fiyatını bilmeksizin böyle büyük ama çok da belirli bir alışveriş yapmak, dünyanın en uzman alışverişçisini bile çok zorlayacaktır. Geçer akçenin para değil de enerji olduğu sicim kuramında, yaklaşık hesaplamalar, enerjilerin buna benzer şekilde

birbirini iptal etmesinin kesinlikle *gerçekleşebileceğini* kuşkuya yer bırakmayacak bir biçimde göstermiştir. Fakat sonraki bölümlerde giderek açıklık kazanacak sebeplerden ötürü, enerjilerin birbirini iptal etmesini bu kadar yüksek bir kesinlik düzeyinde doğrulamak genelde bugünkü kuramsal bilgimizin ötesindedir. Öyle olsa bile, daha önce de belirttiğimiz gibi, sicim kuramının bu ince detaylara o kadar duyarlı olmayan başka birçok özelliğini tam olarak belirleyip anlayabileceğimizi de göreceğiz.

Böylece sicim geriliminin çok yüksek olmasının üçüncü sonucuna geliyoruz. Sicimler sonsuz sayıda farklı titreşim örüntüsü gösterebilir. Örneğin Şekil 6.2'de, giderek artan sayıda tepe noktası ve çukur noktası olan, sonu gelmez bir olasılıklar dizisinin başlangıcını gösterdik. Peki ama bu, bu diziye karşılık gelen sonu gelmez bir temel parçacık dizisi olması gerektiği ve bu durumun Tablo 1.1 ve 1.2'de özetlenen deneysel durumla görünüşte çelişeceği anlamına gelmiyor mu?

Cevap: Evet. Sicim kuramı doğruysa eğer, sonsuz sayıdaki sicim titreşim örüntüsünün her birinin bir temel parçacığa karşılık gelmesi gerekir. Fakat temel bir nokta var: Sicim geriliminin yüksek olması nedeniyle bu titreşim örüntülerinden yalnızca birkaçı son derece ağır parçacıklara karşılık gelecektir (o birkaç örüntü de kuantum sicim çalkalanmalarının neredeyse tamamen iptal ettiği en düşük enerjili titreşim örüntüleridir). Burada "ağır" ifadesi Planck kütlesinden kat kat daha ağır anlamına gelmektedir. Bugün en güçlü parçacık hızlandırıcılarımız dahi, sadece protonun kütlesinden bin kat daha yüksek kütleler düzeyindeki enerjilere, yani Planck enerjisinden milyon kere milyar daha düşük düzeydeki enerjilere ulaşabildiğinden, sicim kuramının öngördüğü bu yeni parçacıkları laboratuvar ortamında araştırmaktan çok çok uzağız.

Ama bu parçacıkları aramakta kullanabileceğimiz daha dolaylı yaklaşımlar var. Örneğin evrenin doğuşunda var olan enerjiler, bu parçacıklardan çok bol miktarda ortaya çıkaracak kadar yüksek olmuş olmalıdır. Genelde bu parçacıkların günümüze ulaşmış olması beklenmez; aslında süper-ağır parçacıklar genelde kararsızdır,

muazzam kütleleri dağılır, yani giderek daha hafif parçacıklara bozunurlar ve sonunda bizi çevreleyen dünyadaki bildik, nispeten daha hafif parçalara dönüşürler. Gelgelelim böyle süper-ağır bir sicim titreşimi durumunun -Büyük Patlama'nın bir kalıntısının- bugüne ulaşmış olması mümkündür. IX. Bölüm'de daha kapsamlı olarak tartışacağımız üzere, bu tür parçacıkların bulunması en hafif tabirle anıtsal bir keşif olacaktır.

Sicim Kuramında Kütle çekimi ve Kuantum Mekaniği

Sicim kuramının sunduğu birleştirici çerçeve ikna edicidir. Fakat kuramın asıl cazibesi, kütleçekimi kuvveti ile kuantum mekaniği arasındaki çatışmayı giderme becerisidir. Genel görelilik ile kuantum mekaniğini birleştirmekteki sorunun, genel göreliliğin temel ilkesi (uzayın ve zamanın düzgün bir eğri şeklinde bir geometrik yapısının olması) ile kuantum mekaniğinin temel özelliği (uzay ve zamanın dokusu da dahil, evrendeki her şeyin giderek küçülen mesafe ölçeklerinde incelendiklerinde daha şiddetlenen kuantum dalgalanmaları göstermesi) birbirlerine ters düştüğünde ortaya çıktığını hatırlayalım. Planck-altı ölçekteki mesafelerde kuantum dalgalanmaları o kadar şiddetlidir ki, uzayın düzgün bir eğri şeklinde bir geometriye sahip olduğu kavrayışı bozulur; bu da genel görelilik kuramının çökmesi anlamına gelir.

Sicim kuramı, uzayın kısa mesafe ölçeğindeki özelliklerini "gidererek" şiddetli kuantum dalgalanmalarını yumuşatır. Bunun aslında ne anlama geldiği, çatışmayı nasıl çözdüğü sorusuna verilebilecek bir kaba, bir de daha kesin bir cevap vardır, ikisini de sırayla ele alalım.

Kaba Cevap

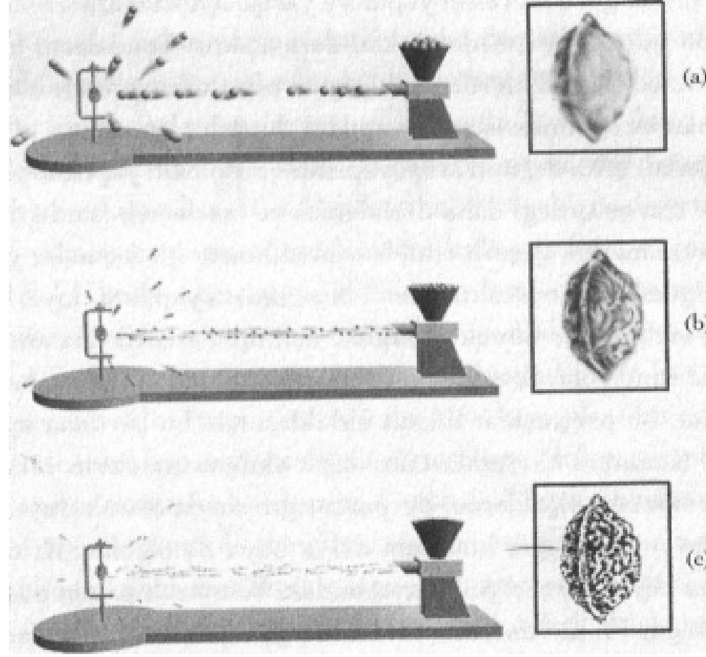
Kulağa fazla basit gelse de, bir nesnenin yapısını öğrenmenin yollarından biri, o nesneye başka nesneler fırlatarak, fırlattığımız bu nesnelerin tam olarak nasıl doğrultu değiştirdiğini gözlemektir. Örneğin, gözlerimiz baktığımız nesneye çarpıp yansıyan fotonların taşıdığı bilgiyi topladığı, beynimiz de o bilgiyi deşifre ettiği için o

nesneyi *görebiliyoruz.* Parçacık hızlandırıcıları da aynı ilkeye dayanır: Elektron ve proton gibi madde parçacıklarını hem birbirleriyle hem de başka hedeflerle çarpıştırırlar, çok hassas detektörler de söz konusu nesnelerin yapısını belirlemek için ortaya çıkan kalıntı bulutunu analiz eder.

Genel kural olarak, kullandığımız *sondanın büyüklüğü* duyarlı olduğumuz uzunluk ölçeğinin alt sınırını belirler. Bu önemli ifadenin ne anlama geldiğini biraz olsun anlayabilmek için, Slim ile Jim'in biraz kültür sahibi olmak amacıyla bir resim kursuna kaydolduğunu düşünelim. Dönem ilerledikçe Jim, Slim'in bir ressam olarak giderek yetkinleşmesine fena halde bozulur ve sıradışı bir yarışma yapmayı önererek Slim'e meydan okur. Bir şeftali çekirdeği alıp bir mengenenin içine sıkıca yerleştirecek ve aslına en sadık "natürmortu" yapmaya çalışacaklardır. Yalnız Jim'in bu meydan okumasında alışılmadık bir koşul vardır: Ne kendisi ne de Slim şeftali çekirdeklerine bakacaktır. İkisi de çekirdeklerinin büyüklüğünü, şeklini, özelliklerini yalnızca çekirdeğe bir şeyler (foton dışında bir şeyler ama!) fırlatıp fırlattıkları şeylerin nasıl doğrultu değiştirdiğini gözlemleyerek (Şekil 6.4'te gösterildiği gibi) öğrenecektir. Fakat .Tim Slim'den habersiz onun "tabancasını" misketle (Şekil 6.4 (a)), kendi "tabancasını" da çok daha küçük, beş milimetre çapında saçmayla (Şekil 6.4 (b)) doldurur. İkisi de tabancalarını ateşler ve yarışma başlar.

Bir süre sonra, Slim'in yapabildiği en iyi resim Şekil 6.4 (a)'daki resim olur. Slim, doğrultu değiştiren misketlerin havada izlediği eğri yolu gözleyerek çekirdeğin küçük ve yüzeyi sert bir kütle olduğunu öğrenmiştir. Ama öğrenebildiği tek şey bu olur. Çünkü misketler şeftali çekirdeğinin ince kıvrımlarla dolu yüzeyine duyarlı olamayacak kadar büyüktür. Slim, Jim'in (Şekil 6.4 (b)'de gösterilen) resmine baktığında yarışmayı kaybettiğini görüp şaşırır. Ama Jim'in tabancasına bakar bakmaz hileyi anlar: Jim'in kullandığı daha küçük sondaların yansıma açıları, çekirdeğin yüzeyindeki en büyük kıvrımlardan bazılarından etkilenecek kadar küçüktür. Dolayısıyla Jim, çekirdeğe çok sayıda beş milimetrelik saçma atıp bu saçmaların çekirdekten yansıdıktan sonra havada izledikleri eğri yolları

gözleyerek daha ayrıntılı bir resim çizebilmiştir. Yenilgiyi kabul etmeyen Slim kendi tabancasını çekirdeğin yüzeyindeki en ince kıvrımlara girip doğrultu değiştirebilecek kadar küçük sondalarla -yarım milimetrelik saçmayla- doldurur. Şeftali çekirdeğine çarpan bu sondaların nasıl doğrultu değiştirdiğini gözleyerek de Şekil 6.4 (c)'de görülen resmi yapar ve yarışmayı kazanır.



Şekil 6.4 Bir şeftali çekirdeği bir mengeneye yerleştirilir ve yalnızca ona fırlatılan şeylerin -"sondaların"- nasıl doğrultu değiştirdiği gözlenerek resmi yapılır. Daha küçük parçacıklar kullanılırsa -(a) misketler, (b) beş milimetrelik saçmalar, (c) yarım milimetrelik saçmalar- daha ayrıntılı resimler yapılabilir.

Bu küçük yarışmadan çıkan ders açıktır: Sondaların incelenen fiziksel özelliklerden çok büyük olmaması gerekir; çünkü o zaman incelenmek istenen yapılara duyarlı olamazlar.

Şeftali çekirdeğinin atom yapısını ve atomaltı yapısını belirlemek için çekirdeği daha derinlemesine incelemek istediğimizde de aynı mantık geçerli olur. Yarım milimetrelik saçmalar yararlı bilgiler sunmayacaktır; atom ölçeğindeki yapılara duyarlı olamayacak kadar büyük oldukları açıktır. Parçacık hızlandırıcılarda sonda olarak

elektron ve proton kullanılmasının sebebi de budur, bu parçacıklar küçük oldukları için bu işe daha uygundur. Kuantum kavramlarının klasik akıl yürütmelerin yerini aldığı atomaltı ölçeklerde, bir parçacığın sonda olarak duyarlılığı en iyi o parçacığın kuantum dalga boyu ile ölçülür. Kuantum dalga boyu, parçacığın konumundaki belirsizlik payını gösterir. Bu olgu, IV Bölüm'deki Heisenberg'in belirsizlik ilkesine ilişkin tartışmamızı yansıtıyor. Orada, bir nokta parçacığı sonda olarak kullandığımızda (biz fotonların sonda olarak kullanılmasına odaklanmıştık, fakat tartışmamız diğer bütün parçacıklar için de geçerlidir) ortaya çıkan hata payının, sonda olarak kullanılan parçacığın kuantum dalga boyuna hemen hemen eşit olduğunu bulmuştuk. O kadar kesin olmayan bir dille söyleyecek olursak, kuantum mekaniği çalkalanmaları, bir nokta parçacığın sonda olarak duyarlılığını "giderir", tıpkı bir cerrahın elleri titriyorsa neşteri ne kadar isabetli kullandığının bir anlamı kalmaması gibi. Fakat IV. Bölüm'de bir parçacığın kuantum dalga boyunun parçacığın momentumuyla, yani kabaca söyleyecek olursak enerjisiyle, ters orantılı olması gibi önemli bir olgudan da bahsetmiştik. Bu durumda bir nokta parçacığın enerjisini artırarak kuantum dalga boyunu kısaltabilir -kuantum dalgalanmaları da giderilebilir- ve böylece parçacığı daha da küçük fiziksel yapıları incelemekte kullanabiliriz. Sezgilerimize dayanarak şunu söyleyebiliriz ki, yüksek enerjili parçacıkların nüfuz etme gücü daha fazladır, dolayısıyla da daha küçük yapısal özellikleri inceleyebilirler.

Bu konuda, nokta parçacıklar ile sicim demetleri arasındaki farklılık apaçıktır. Şeftali çekirdeğinin yüzey özelliklerini incelemekte kullanılan saçmalar için olduğu gibi, sicimin içkin boyutu da, kendinden çok daha küçük bir şeyin -bu örnekte Planck uzunluğundan daha küçük uzunluk ölçeklerinde ortaya çıkmış yapıların- yapısını incelemekte kullanılmasını engeller. Biraz daha kesin konuşalım: 1988'de, o tarihlerde Princeton Üniversitesinde görevli olan David Gross ile öğrencisi Paul Mende, kuantum mekaniği hesaba katıldığında, bir sicimin enerjisini sürekli artırmanın, sicimin küçük yapıları inceleme becerisini sürekli artırmayacağım göstermişti. Nokta parçacıklarda olanın tam tersi bir durum. Gross ile Mende, bir sicimin enerjisi artırıldığında başlangıçta, tıpkı enerji-

yüklü bir nokta parçacık gibi, daha kısa ölçekteki yapıları inceleyebildiğini gösterdi. Ama sicimin enerjisi, Planck uzunluğu ölçeğindeki yapıları incelemek için gerekli olan enerji miktarının ötesine geçtiğinde, bu fazladan enerji sicimin inceleme yetisini artırmaz. Aksine enerji sicimin *büyümesine* neden olur, dolayısıyla sicimin kısa mesafede duyarlılığı *azalır.* Aslına bakarsanız, tipik bir sicimin büyüklüğü Planck uzunluğundaysa da, bir sicime yeterince enerji -hayal edemeyeceğimiz kadar çok, ancak muhtemelen Büyük Patlama'da ortaya çıkmış enerji kadar bir enerji-yükleyebilseydik, sicimin *makroskobik* büyüklüğe çıkmasını sağlayabilirdik; mikrokozmosu incelemek için epeyi kullanışsız olurdu yani! Bir sicim, bir nokta parçacığın tersine, sanki *iki* giderme kaynağına sahip gibidir: Biri, nokta parçacıklar açısından söz konusu olduğu gibi kuantum çalkalanmaları, diğeri de kendi içkin boyutu. Bir sicimin enerjisini artırmak, ilk kaynağın gidermesini azaltır, ama eninde sonunda İkincisinin gidermesini artırır. Yani ne kadar çabalarsanız çabalayın, sicimin boyutunun olması, bir sicimi Planck uzunluğunun altındaki mesafelerdeki olguları incelerken kullanmanızı engeller.

Gelgeldim, genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki bütün çatışma da uzamsal dokunun Planck uzunluğu altındaki uzunluklara özgü özelliklerinden kaynaklanmaktadır. *Eğer evrenin temel bileşeni Planck ölçeğinin altındaki mesafeleri inceleyemiyorsa, o zaman ne o, ne de ondan oluşan herhangi bir şey yıkıcı olduğu varsayılan kısa-mesafeli kuantum dalgalanmalarından etkilenir.* Bu durum, elimizi cilalı bir granit yüzeye sürdüğümüzde olan şeye benzer. Mikro düzeyde granit parçalı, damarlı ve pürtüklü olsa da, parmaklarımız küçük ölçekli bu değişiklikleri fark edemez ve yüzey bize dümdüz gelir. Kısa ve geniş parmaklarımız mikro farklılıkları "giderir". Aynı şekilde, sicimin de bir boyutu olduğundan, onun da kısa mesafe duyarlılığının bir sınırı vardır; Planck-altı ölçeklerdeki değişiklikleri tespit edemez. Parmaklarımızı granite sürdüğümüzde olduğu gibi, sicim de kütle çekimsel alandaki ultramikroskobik çalkalanmaları giderir. Sonuçta geri kalan dalgalanmalar hâlâ çok önemli olsa da, bu giderme onları genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki uyumsuzluğu yok edecek kadar "düzleştirir". Bilhassa da kütleçekiminin kuantum kuramını oluştururken nokta parçacık

yaklaşımını benimsediğimizde ortaya çıkan (bir önceki bölümde tartıştığımız) o tehlikeli sonsuzlar, sicim kuramıyla ortadan kalkar.

Granit benzetmesiyle uzamsal dokuya ilişkin asıl sorun arasındaki temel bir farklılık, granitin yüzey indeki mikro ölçekteki değişiklikleri ortaya koymanın yolları *olmasıdır:* Parmaklarımızdan daha ince, daha hassas sondalar kullanılabilir. Bir elektron mikroskobu yüzey özelliklerini, santimetrenin milyonda birinden daha yüksek bir hassasiyetle çözebilir; yüzeydeki çok sayıda kusuru ortaya çıkarmaya yetecek kadar küçük bir ölçektir bu. Oysa bunun tersine sicim kuramında, uzayın dokusunda bulunan Planck-altı ölçekteki "kusurları" göstermenin bir yolu yoktur. Sicim kuramının yasalarıyla yönetilen bir evrende, doğayı giderek daha da küçük mesafelere bölebileceğimizi, bunun bir sınırının olmadığını söyleyen geleneksel kavrayış geçerli değildir. Bir sınır *vardır ve* bu sınır, biz daha Şekil 5.1 de görülen yıkıcı kuantum kargaşasıyla karşılaşmadan etkisini gösterir. Dolayısıyla sonraki bölümlerde daha belirgin hale gelecek bir anlamda, varsayılan Planck-altı kuantum dalgalanmalarının *var olmadığı* bile söylenebilir. Bir pozitivist, bir şeyin ancak -en azından prensipte- incelenip ölçülebiliyorsa var olduğunu söyleyecektir. Sicimin evrendeki en temel nesne olduğu varsayıldığından ve sicim de uzamsal dokuda bulunan Planck-altı uzunluktaki şiddetli dalgalanmalardan etkilenmeyecek kadar büyük olduğundan bu dalgalanmalar ölçülemez, dolayısıyla sicim kuramına göre de, aslında ortaya çıkmazlar.

Zekice Bir Hile mi?

Bu tartışma sizi tatmin etmemiş olabilir. Sicim kuramının uzayın Planck-altı uzunluktaki kuantum dalgalanmalarını yumuşattığını göstermek yerine, konudan kaçmak için sicimin sıfırdan farkmı büyüklüğünü kullanmış gibi görünüyoruz. Gerçekten de çözdüğümüz bir şey oldu mu acaba? Evet, oldu. Birazdan ele alacağımız iki nokta bunu gösterecek.

Öncelikle, biraz önceki sav şu anlama geliyor: Sorunlu olduğu varsayılan Planck-altı uzunluktaki uzamsal dalgalanmalar, genel

göreliliği ve kuantum mekaniğini nokta parçacık çerçevesinde formüle etmenin bir ürünüdür. Dolayısıyla bir anlamda, çağdaş kuramsal fiziğin temel problemi, kendi kendimize yarattığımız bir problemdir. Önceleri bütün madde parçacıklarını ve bütün kuvvet parçacıklarını, kelimenin tam anlamıyla, uzamsal boyutları olmayan nokta benzeri nesneler olarak düşündüğümüz için, evrenin özelliklerini de "keyfi" kısa mesafe ölçeklerinde düşünmek zorunda kalıyorduk. En küçük mesafeler söz konusu olduğunda da, altından kalkılamazmış gibi görünen sorunlarla karşı karşıya kalıyorduk. Sicim kuramı bize, sadece oyunun asıl kurallarını anlamadığımız için bu sorunlarla karşılaştığımızı söyler. Yeni kurallarsa, evreni inceleme hassaslığımızın bir sınırı olduğunu, yani aslında geleneksel mesafe kavrayışımızı evrenin ultramikroskobik yapısına hassas bir şekilde uygulayabilmemizin de bir sınırı olduğunu söyler. Varsayılan tehlikeli uzamsal dalgalanmalar, artık kuramlarımızdan kaynaklanıyormuş gibi görünmektedir; çünkü daha önce bu sınırların varlığını bilmiyorduk ve dolayısıyla da nokta parçacık yaklaşımı fiziksel gerçekliğin sınırlarını fena halde aşmamıza yol açmıştı.

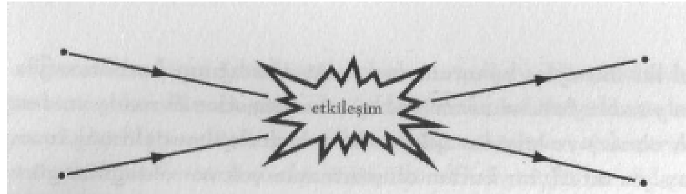
Bu çözümün, genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki sorunu bariz bir basitlikle aştığı dikkate alındığında, birinin çıkıp da nokta parçacık yaklaşımının bir idealleştirmeden ibaret olduğunu, gerçek dünyada temel parçacıkların bir uzamsal boyutu olduğunu ileri sürmesinin neden bu kadar uzun sürdüğünü merak edebilirsiniz. Bu da bizi, üzerinde durmak istediğimiz ikinci noktaya getiriyor. Uzun zaman önce Pauli, Heisenberg, Dirac ve Feynman yani kuramsal fiziğin en büyük beyinlerinden bazıları, doğanın bileşenlerinin aslında noktalar olmayabileceğini, küçük ve dalgalanan "kabarcıklar" ya da "topaklar" olabileceğini *ileri sürmüştü.* Gelgelelim onlar da başkaları da, temel bileşeni bir nokta parçacık olmayan, yine de fiziğin en temel iki ilkesiyle, kuantum mekaniği olasılığının korunmasıyla (bu yüzden fiziksel nesneler hiç iz bırakmadan evrende aniden yok olmaz) ve bilginin ışıktan daha hızlı iletilmesinin imkânsız oluşuyla tutarlı bir kuram oluşturmanın çok zor olduğunu gördüler. Bu fizikçilerin yaptığı araştırmalar, nokta parçacık paradigması bir kenara bırakıldığında bu ilkelerden birinin ya da ikisinin birden çiğnendiğini çok çeşitli bakış açılarından tekrar tekrar gösterdi.

Dolayısıyla da, nokta parçacıklardan başka bir şey üzerine kurulu, anlamlı bir kuantum kuramı bulmak uzun bir süre imkânsızmış gibi göründü. Sicim kuramının gerçekten etkileyici olan yönü şudur: Yirmi yılı aşkın bir süredir devam eden titiz araştırmalar, bazı özellikleri tanıdık olmasa da sicim kuramının, anlamlı bir fiziksel kurama içkin olması gereken bütün özelliklere *uyduğunu* göstermiştir. Üstelik sicim kuramı graviton titreşim örüntüsü sayesinde, kütleçekimini de içeren bir kuantum kuramıdır.

Daha Net Cevap

Kaba cevap, önceki nokta parçacık kuramları başarısızlığa uğrarken, sicim kuramının neden üstün geldiği sorusunun özünü yakalıyordu. Bu yüzden isterseniz tartışmamızın mantıksal akışından uzaklaşmadan bir sonraki bölüme de geçebilirsiniz. Fakat II. Bölüm'de özel göreliliğe ilişkin temel fikirleri geliştirmiş olduğumuzdan, elimizde sicim kuramının şiddetli kuantum dalgalanmalarını nasıl yatıştırdığını daha doğru bir biçimde betimlemek için gerekli araçlar var.

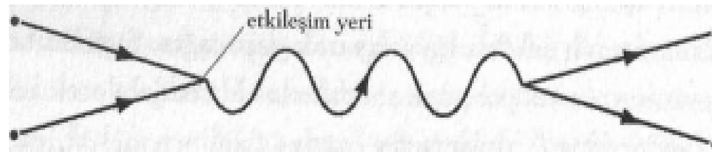
Vereceğimiz daha kesin cevap, kaba cevabın özündeki fikre dayanacak, ama bu fikri doğrudan sicimler düzeyinde ifade edeceğiz. Bunu, nokta parçacıkları ve sicimleri sonda olarak biraz daha detaylı şekilde kıyaslayarak yapacağız. Sicimin boyutu olmasının, nokta parçacık sondalarla elde edilebilecek bilgiyi nasıl "giderdiğini", dolayısıyla çağdaş fiziğin temel ikileminin sebebi olan ultra-kısa-mesafedeki davranışları nasıl ortadan kaldırdığını göreceğiz.



Şekil 6.5 İki parçacık etkileşime girer -birbirleriyle "çarpışır"- ve bunun sonucunda ikisinin de izlediği yol değişir.

Önce, gerçekten var olsalardı nokta parçacıkların birbirleriyle nasıl etkileşeceklerini, dolayısıyla fiziksel sondalar olarak nasıl kullanılabileceklerini düşünelim. En temel etkileşim. Şekil 6.5'te görüldüğü üzere, yolları kesişecek şekilde bir çarpışma hattı üzerinde ilerleyen iki nokta parçacık arasındaki etkileşimdir. Bu parçacıklar bilardo topu olsalardı çarpışırlardı ve her ikisinin de izlediği yol değişirdi. Nokta parçacıklara dayalı kuantum alan kuramı, temel parçacıklar çarpıştığında da esasen aynı şeyin olduğunu - birbirlerine çarpıp doğrultu değiştirdiklerini- gösterir, ama ayrıntılar biraz farklıdır.

Somutluk ve basitlik adına bu iki parçacıktan birinin elektron, diğerinin ise onun karşı parçacığı pozitron olduğunu düşünün. Madde ve karşı madde çarpıştığında saf bir enerji çakımıyla ortadan kalkabilirler ve ortaya, örneğin bir foton çıkabilir.’ Bu fotonun izlediği yolu, elektron ile pozitronun önceden izledikleri yollardan ayırmak için fizikteki geleneksel bir tutumu benimser ve bu yolu dalgalı bir çizgiyle belirtiriz. Normalde foton biraz yol alıp sonra baştaki elektron-pozitron çiftinden aldığı enerjiyi serbest bırakınca başka bir elektron-pozitron çifti üretir; bu elektron ve pozitron da Şekil 6.6'da, en sağda gösterilen yolları izler. Yani iki parçacık çarpıştırılmış, elektromanyetik kuvvet sayesinde etkileşime girmiş ve sonuçta da yolları değişmiş olarak belirmişlerdir. Bu bilardo toplarının çarpışmasıyla ilgili betimlemeye biraz benzeyen bir olaylar dizisidir.

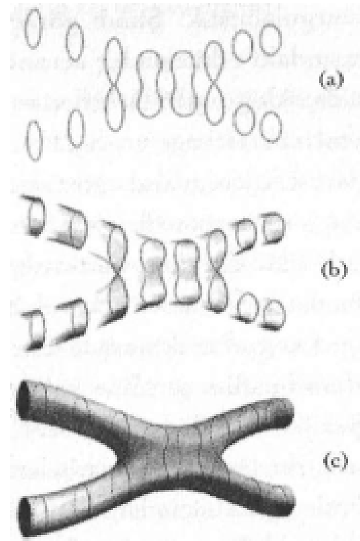


Şekil 6.6 Kuantum alan kuramında, bir parçacık ile onun karşı parçacığı bir anlığına birbirlerini yok edebilir ve bundan bir foton ortaya çıkabilir. Ardından bu foton, farklı yollar izleyen bir başka parçacık ve karşı parçacık ortaya çıkarabilir.

Biz bu etkileşimin ayrıntılarıyla ilgiliyiz; özellikle de baştaki elektronun ve pozitronun ortadan kalkıp fotonu ürettiği noktayla. Birazdan açıklık kazanacağı üzere asıl önemli olan nokta, bu olayın

gerçekleştiği kesin ve tümüyle belirlenebilir bir zaman ve yer olmasıdır. Bu yer Şekil 6.6'da gösterilmiştir.

Sıfır boyutlu noktalar olduğunu düşündüğümüz nesneleri inceleyip de aslında tek boyutlu sicimler olduklarını anlamamız, biraz önce yaptığımız betimlemeyi nasıl değiştirir? Temel etkileşim süreci aynıdır, ama artık çarpışma hattındaki nesneler. Şekil 6.7'de görüldüğü üzere salınım halindeki ilmeklerdir. Bu ilmekler tam da gereken titreşim örüntüleriyle titreşiyorlarsa. Şekil 6.6'da görüldüğü gibi çarpışma hattındaki bir elektrona ve bir pozitrona karşılık geleceklerdir. Ancak bugünkü teknolojimizin erişebileceğinden çok daha küçük, en küçük uzaklık ölçeklerinde incelendiklerinde, gerçek nitelikleri yani sicim benzeri özellikleri belli olacaktır. Nokta parçacık örneğinde olduğu gibi, iki sicim çarpışır ve bir çakımla birbirlerini ortadan kaldırır. Bu çakım, yani fotonun kendisi, belli bir titreşim örüntüsüne sahip bir sicimdir. Böylece, Şekil 6.7'de görüldüğü üzere, iki ayrı sicim birbirleriyle etkileşime girip birleşir ve üçüncü bir sicim oluşturur. Tıpkı nokta parçacık betimlememizde olduğu gibi bu sicim biraz yol alır, sonra baştaki iki sicimden aldığı enerjiyi serbest bırakarak iki ayrı sicime ayrılır, o sicimler de yollarına devam eder. En mikro bakış açısı dışındaki bütün bakış açılarından, bu durum tıpkı Şekil 6.6'da görülen nokta parçacık etkileşimi gibi görünecektir.



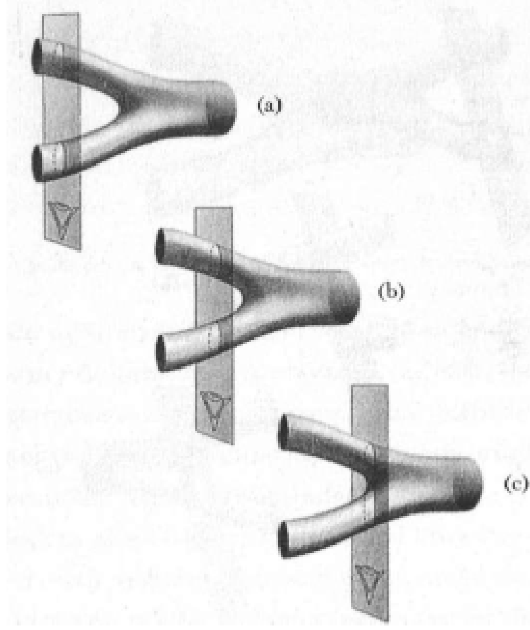
Şekil 6.7 (a) Çarpışan iki sicim birleşip üçüncü bir sicim oluşturabilir, ardından bu sicim tekrar iki sicime ayrılabilir ve bu sicimler doğrultu değiştirmiş olarak ilerleyebilir, (b) Buradaki süreç de (a)'da görülen sürecin aynısı, ancak sicimlerin hareketi vurgulanıyor, (c) Etkileşim halindeki iki sicimin bir "dünya-yaprağını" nasıl taradığını gösteren bir "time-lapse" fotoğrafı.

Gelgelelim iki betimleme arasında önemli bir fark var. Nokta parçacık etkileşiminin uzay ve zamanda belirlenebilir bir noktada, bütün gözlemcilerin üzerinde hemfikir olabileceği bir yerde gerçekleştiğini vurgulamıştık. Şimdi göreceğimiz gibi, bu durum sicimler arasındaki etkileşimler açısından geçerli *değildir.* Bunu II. Bölüm'de olduğu gibi birbirlerine göre hareket halinde olan iki gözlemcinin, George'un ve Gracie'nin bu etkileşimle ilgili betimlemelerini kıyaslayarak göstereceğiz. Gözlemcilerimizin, iki sicimin birbirlerine ilk olarak ne zaman ve nerede değdiği konusunda fikir birliğine varamadığını göreceğiz.

Bunu yapabilmek için, iki sicim arasındaki etkileşimi, örtücüsü açık tutulan bir fotoğraf makinesiyle izlediğimizi, böylece sürecin bütün tarihini bir film şeridine kaydedebildiğimizi düşünelim. Sonuç Şekil 6.7 (c)'de görülüyor: *Sicim dünya-yaprağı.*

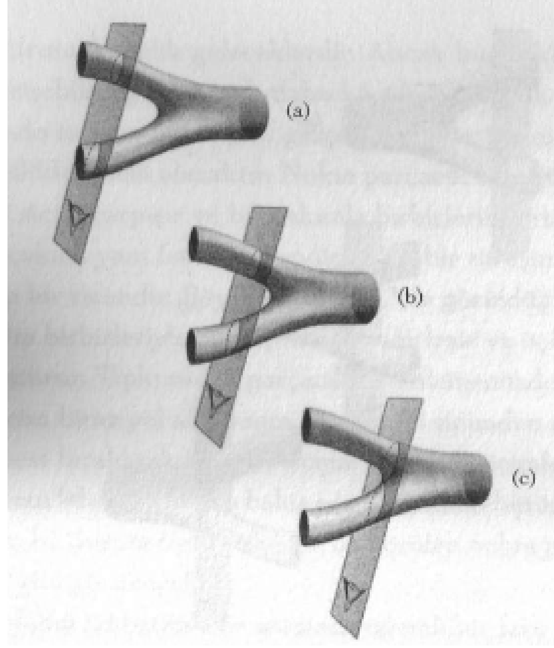
Dünya-yaprağını birbirine paralel parçalar halinde "dilimleyerek" -ekmek dilimler gibi- sicimlerin etkileşimlerinin tarihi an be an yeniden elde edilebilir. Bu dilimlemenin bir örneği Şekil 6.8'de gösteriliyor. Şekil 6.8 (a)'da birbirine yaklaşmakta olan iki sicime dikkatle bakan George'un gözü ve George'un bakış açısına göre *uzayda aynı anda meydana gelmekte olan bütün* olayları dilimlere ayıran bir düzlem görülüyor. Önceki bölümlerde sık sık yaptığımız gibi, görsel açıdan kolaylık sağlayabilmek için bu şekilde de uzamsal boyutlardan birini göstermiyoruz. Gerçekte tabi ki, bütün gözlemcilere göre aynı anda olan üçboyutlu bir olaylar dizisi vardır. Şekil 6.8 (b) ve 6.8 (c)'de George'un iki sicimin birbirine yaklaşmasını nasıl gördüğünü gösteren, birbirini izleyen iki görüntü -dünya-yaprağının birbirini izleyen "dilimleri"- var. En önemlisi. Şekil 6.8 (c)'de George'a göre,

zamanda iki sicimin birbirine ilk kez değdiği ve birleştiği, üçüncü bir sicimin ortaya çıktığı an gösteriliyor.



Şekil 6.8 Birbirine yaklaşan iki sicimin zamanda birbirini izleyen üç anda, George'un bakış açısından görünüşü, (a)'da ve (b)'de sicimler birbirlerine yaklaşıyor; (c)'de George'un bakış açısından sicimler ilk kez birbirine değiyor.

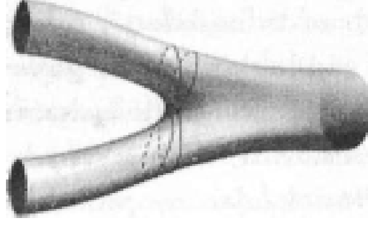
Şimdi aynı şeyi Gracie için yapalım. II. Bölüm'de gördüğümüz gibi George ile Gracie'nin göreli hareket halinde olması, hangi olayların aynı anda olduğu konusunda hemfikir olmadıkları anlamına gelir. Şekil 6.9'da gösterildiği üzere, Gracie'nin bakış açısına göre, uzayda aynı anda olan olaylar farklı bir düzlemde yer almaktadır. Yani Gracie'nin bakış açısına göre, etkileşimin an be an ilerleyişinin ortaya konabilmesi için Şekil 6.7 (c)'deki dünya-yaprağının farklı bir açıyla "dilimlenmesi" gerekir.



Şekil 6.9 Birbirine yaklaşan iki sicimin zamanda birbirini izleyen üç anda, Gracie'nin bakış açısından görünüşü, (a)'da ve (b)'de sicimler birbirlerine yaklaşıyor; (c)'de Gracie'nin bakış açısından sicimler ilk kez birbirine değiyor.

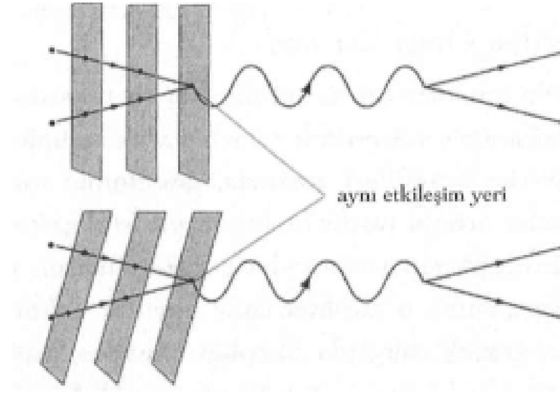
Şekil 6.9 (b) ve 6.9 (c)'de, birbirine yaklaşan iki sicimin birbirine değdiği ve üçüncü bir sicimin ortaya çıktığı an da dahil olmak üzere, zamanda birbirini izleyen anları bu kez Gracie'nin bakış açısına göre gösteriyoruz.

Şekil 6.10'da görüldüğü üzere. Şekil 6.8 (c) ile Şekil 6.9 (c)'yi kıyasladığımızda George ile Gracie'nin iki sicimin birbirine ilk kez ne zaman ve nerede değdiği -nerede etkileşime girdikleri-konusunda hemfikir olmadığını görüyoruz. Sicim uzamda bir boyuta sahip olduğu için *iki sicimin ilk kez birbirine değdiği uzaydaki yer ve zamandaki an, belirsiz bir yer ve belirsiz bir an değildir;* bu, gözlemcinin hareketine bağlıdır.



Şekil 6.10 George ile Gracie, iki sicim arasındaki etkileşimin yeri konusunda anlaşamaz.

Tamamen aynı mantığı. Şekil 6.11'de özetlendiği gibi, nokta parçacıkların etkileşimine uygulayacak olursak, daha önce ifade edilen sonuca varırız: Nokta parçacıklar birbirleriyle uzayda belli bir noktada ve zamanda belli bir anda etkileşime girer. Nokta parçacıklar bütün etkileşimlerini belli bir noktaya sıkıştırır. Etkileşime giren kuvvet kütleçekimi kuvvetiyse, yani etkileşimde yer alan haberci parçacık foton değil de gravitonsa, kuvvetin gücünün tek bir noktaya sıkışması, feci sonuçlara yol açar, daha önce dolaylı olarak bahsettiğimiz sonsuz cevaplar gibi. Oysa bunun tersine sicimler, etkileşimlerin meydana geldiği yeri "düzler". Farklı gözlemciler, etkileşimin Şekil 6.10'daki yüzeyin sol kısmında farklı yerlerde meydana geldiğini gördüklerinden, bu gerçek anlamda, etkileşim yerinin hepsinde "düzlendiği" anlamına gelir. Bu da kuvvetin gücünü dağıtır; kütleçekimi kuvveti örneğinde, bu yayılma kuvvetin ultramikroskobik özelliklerini büyük oranda hafifletir; o kadar ki yapılan hesaplardan, daha önceki sonsuzlar yerine gayet makul sonlu cevaplar elde edilir. Bu, geçen kısımda bahsettiğimiz kaba cevapta karşımıza çıkan yayılmanın daha kesin bir halidir. Ve bir kez daha bu yayılma Planck-altı-uzunluktaki mesafeler birbirine karıştıkça, uzayın ultramikroskobik çalkalanmalarının yumuşamasıyla sonuçlanır.



Şekil 6.11 Göreli hareket halindeki gözlemciler, iki nokta parçacığın birbirleriyle ne zaman ve nerede etkileştiği konusunda anlaşıyor.

Dünyaya çok düşük numaralı ya da çok yüksek numaralı gözlüklerden bakmak gibi, nokta parçacık bir sondanın algılayabileceği Planck-altı ölçekteki çok küçük detaylar, sicim kuramıyla düzlenir ve zararsız hale gelir. Gözleri iyi görmeyen birine önerilebilecek bir tedavi olmasının tersine, eğer sicim kuramı evrene dair nihai betimlemeyse, Planck-altı ölçekteki mesafelerde var olduğu varsayılan dalgalanmaları daha net görmemizi sağlayacak bir düzeltici mercek yoktur. Erişilebilen hatta geleneksel anlamda var olduğu söylenebilen mesafelerle ilgili bir alt sınırın olduğu bir evrende, genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki -ancak Planck-altı ölçekteki mesafelerde belirgin hale gelen- uyumsuzluktan kaçınılmış olur. İşte sicim kuramının betimlediği evren de, ultramikroskobik mesafelerde ortaya çıktığı varsayılan felaket hemen ortadan kalktığı için, büyük olana ilişkin yasalarla küçük olana ilişkin yasaların uyumlu bir biçimde kaynaştırılabildiği bir evrendir.

Sicimlerden Ötesi Var mı?

Sicimler iki sebepten ötürü özeldir. İlki bir boyutları olsa da, kuantum mekaniği çerçevesinde tutarlı olarak betimlenebilirler. İkincisi, titreşim örüntüleri arasında, gravitonun özelliklerine tıpatıp uyan bir örüntü vardır ki, bu durum kütleçekimi kuvvetinin kuramın yapısının ayrılmaz bir parçası olmasını sağlar. Fakat sicim

kuramının, o alışıldık, sıfır boyutlu nokta parçacık kavrayışının gerçek dünyada karşılığı olmayan matematiksel bir idealleştirme olduğunu göstermesinde olduğu gibi, acaba son derece ince, tek boyutlu sicim de benzer bir matematiksel idealleştirme olamaz mı? Acaba aslında sicimlerin bir kalınlığı mı var? Bisiklet tekerleklerinin içindeki iç lastiklerin ikiboyutlu yüzeyleri gibi ya da biraz daha gerçekçi olursak ince bir üçboyutlu simit gibi. Heisenberg, Dirac ve başka fizikçilerin üçboyutlu topaklara dayalı bir kuantum kuramı inşa etme girişimlerinde karşı karşıya kaldıkları altından kalkılamazmış gibi görünen zorluklar, bu doğal akıl yürütme zincirini izleyen araştırmacıları engellemiştir.

Fakat hiç beklenmedik biçimde, 1990'ların ortalarında sicim kuramcıları, dolaylı ve oldukça zekice bir akıl yürütmeyle, bu tür daha fazla boyutlu temel nesnelerin de sicim kuramında önemli ve hemen fark edilmeyen bir rol oynadığını görmüştür. Araştırmacılar yavaş yavaş sicim kuramının yalnızca sicimleri içeren bir kuram *olmadığını* anlamıştır. 1995'te ikinci süpersicim devrimini başlatan Witten ve başka fizikçiler bu devrimin temeli olan, çok önemli bir gözlem yapmıştır. Sicim kuramı aslında çok çeşitli ve farklı boyutlarda bileşenler içerir: Frizbi benzeri ikiboyutlu bileşenler, kabarcık benzeri üçboyutlu bileşenler; hatta daha alışılmadık bileşenlerin de ortaya çıkma olasılığı vardır. Yakın dönemde ulaşılmış bu en yeni kavrayışları XII. ve XIII. Bölüm'de ele alacağız. Ama şimdilik tarihin geçtiği yolda ilerleyip sıfır boyutlu nokta parçacıklardan değil de tek boyutlu sicimlerden oluşan bir evrenin yeni ve çarpıcı özelliklerini araştırmayı sürdüreceğiz.

VII. Bölüm

Süpersicimlerdeki "Süper"

Einstein'ın yıldızların ışığının Güneş'in kütleçekimi tarafından eğilmesiyle ilgili tahminini sınamak için Eddington'ın 1919'da gerçekleştirdiği araştırma gezisinin sonuçları kesinleştiğinde, Hollandalı fizikçi Hendrik Lorentz, Einstein'a bir telgraf gönderip iyi haberi vermişti. Telgrafın genel göreliliğin doğrulandığı haberini verdiği, çevrede yayılıyordu. Bir öğrencisi Einstein'a, Eddington yaptığı deneyde yıldızların ışığının eğilmesiyle ilgili öngörüsünü doğrulayan bir sonuca ulaşmasaydı ne düşüneceğini sorduğunda, Einstein şu cevabı vermişti: "O zaman sevgili Tanrı için üzülürdüm, çünkü kuram *doğru.* Elbette, deneyler gerçekten de Einstein'ın tahminlerini doğrulamasa kuram doğru olmaz, genel görelilik de modern fiziğin temel direklerinden biri haline gelmezdi. Einstein aslında o cümleyi, genel göreliliğin kütleçekimini derin ve gizli bir zarafetle, çok basit ama güçlü fikirlerle betimlediğini, o kadar ki doğanın bunu "göz önüne almayacağını" düşünemediğini anlatmak için söylemişti. Einstein'ın bakış açısına göre genel görelilik, yanlış olamayacak kadar güzeldi.

Gelgelelim estetik yargılar, bilimsel konularda hakem olamaz. Nihayetinde, kuramlar hakkında somut ve deneysel olgularla karşı karşıya kaldıklarında ayakta kalıp kalmadıklarına bakılarak hüküm verilir. Fakat bu son sözümüz çok önemli bir koşula tabidir. Bir kuram inşa edilirken, daha tam olarak geliştirilmemiş olduğu için, ayrıntılı deneysel sonuçları değerlendirilemez. Yine de fizikçilerin, kısmen tamamlanmış kuramlarını hangi yönde araştırmaya devam edecekleri konusunda bir seçim yapmaları, yargıda bulunmaları gerekir. Bu kararların bazıları, kuramın kendi içinde mantıksal bir tutarlılığa sahip olması koşulundan doğar; anlamlı bir kuramın kesinlikle mantıksal saçmalıklardan uzak olması gerekir. Başka bazı kararları ise, bir kuramsal kavramın diğer bir kuramsal kavrama göre niteliksel deney sonuçlarının sezindirdiği bir kavrayış yönlendirir. Genelde, eğer etrafımızdaki dünyada karşılaştığımız herhangi bir

şeyi temsil etme kapasitesi yoksa o kuramla ilgilenmeyiz. Fakat, kuramsal fizikçilerin verdiği bazı kararların da estetik bir duyguya, bize hangi kuramın yaşadığımız dünya kadar zarif, yapısının onun kadar güzel olduğunu söyleyen bir duyguya dayandığı da bir gerçektir. Elbette kimse bu stratejinin bizi gerçeğe götüreceğini garanti edemez. Belki de derinlerde evrenimizin yapısı, deneyimlerimizin düşündürdüğü kadar zarif değildir; belki de o kadar tanıdık olmayan bağlamlara uygulandığında bugünkü estetik ölçütlerimizi daha da inceltmemiz, rafine etmemiz gerektiğini göreceğiz. Yine de, kuramların evrenin deneysel olarak incelemenin giderek daha da zorlaştığı alanlarını betimlediği bir çağa girerken, fizikçiler aksi takdirde sapabilecekleri çıkmaz sokaklardan uzak durabilmek için böyle bir estetiğin yardımına sırtlarını dayamışlardır. Şimdiye kadar bu yaklaşım güçlü ve derinlikli bir kılavuz olduğunu göstermiştir.

Sanatta olduğu gibi fizikte de, simetri estetiğin kilit bir bileşenidir. Fakat sanatta olduğunun tersine fizikte simetrinin çok somut ve kesin bir anlamı vardır. Aslına bakarsanız bu somut simetri kavrayışını, matematiğe de gayretle uygulayan fizikçiler, son yirmi otuz yıl içinde, madde parçacıkları ile haberci parçacıkların birbirleriyle önceden mümkün olduğu sanılandan çok dahayakından ilişkili olduğu kuramlar oluşturmuştur. Yalnızca doğadaki kuvvetleri değil, maddi bileşenleri de bir araya getiren bu tür kuramlar, mümkün olan en fazla simetriye sahiptir, bu yüzden de *süpersimetrik* diye nitelenirler. Birazdan göreceğimiz üzere süpersicim kuramı süpersimetrik çerçevenin hem ilk hem de zirve noktası niteliğindeki örneğidir.

Fizik Yasalarının Doğası

Fizik yasalarının moda kadar kısa ömürlü olduğu, yıldan yıla, haftadan haftaya hatta andan ana değiştiği bir evren düşünün. Böyle bir dünyada, fizik yasalarındaki bu değişikliklerin temel hayat süreçlerini kesintiye uğratmayacağını varsaymak koşuluyla, en hafif tabirle tek bir anınız bile sıkıcı olmayacaktır. Rasgele değişiklikler, hem sizin hem de başkalarının geçmiş deneyimlerini gelecekteki

sonuçlara dair tahminlerde bulunmak üzere kullanmasını engelleyeceği için en basit eylemler bile bir macera olacaktır.

Böyle bir evren, bir fizikçinin kâbusudur. Evrenin istikrarı fizikçiler için -herkes gibi- hayati önem taşıyan bir dayanaktır: Bugün geçerli olan yasalar dün de geçerliydi, yarın da geçerli olacaklar (hepsini anlayacak kadar akıllı olmasak bile). Ne de olsa, eğer birdenbire değişebiliyorsa "yasa" teriminin ne anlamı olabilir ki? Ama bu evrenin durağan olduğu anlamına gelmez; evren bir andan diğerine sayılamayacak kadar çok biçimde değişir kuşkusuz. Bu daha çok değişimi yönlendiren yasaların sabit ve değişmez olduğu anlamına geliyor. Bunun doğru olduğunu gerçekten biliyor muyuz, diye sorabilirsiniz. Aslında bilmiyoruz. Fakat evrenin Büyük Patlama'dan kısacık bir an geçtikten sonraki halinden itibaren günümüzdeki haline dek çok sayıda özelliğini betimlemekteki başarımız, eğer değişiyorlarsa da, yasaların çok çok yavaş değiştiğini düşündürüyor bize. Bildiğimiz her şeyle tutarlı olan en basit varsayım, yasaların sabit olduğudur.

Fizik yasalarının, yerel kültürler kadar sınırlı ve çeşitli olduğu bir evren düşünelim şimdi de; biryerden diğerine geçildiğinde öngörülemez biçimde değiştiklerini, dışarıdan gelen uyum göstermeleri yönündeki etkilere cüretkârca direndiklerini. Gulliver'in seyahatlerinde olduğu gibi, eğer öyle bir dünyada seyahat ederseniz inanılmaz ölçüde zengin, bir dizi öngörülemez deneyime maruz kalırsınız. Fakat bir fizikçinin bakış açısından, bu da başka bir kâbustur. Örneğin bir ülkede -hatta bir eyalette- geçerli olan yasaların, başka bir ülkede geçerli olmayabileceği gerçeğiyle yaşamak bile zordur. Eğer *doğa* yasaları o kadar çeşitli olsaydı, işlerin nasıl olacağını bir düşünün. Öyle bir dünyada, bir yerde gerçekleştirilen deneylerin, başka bir yerde geçerli olan fizik yasalarıyla hiçbir ilgisi olmazdı. Fizikçiler, farklı yerlerde geçerli olan doğa yasalarını öğrenmek için aynı deneyleri farklı yerlerde tekrar tekrar yapmak zorunda kalırdı. Şükürler olsun ki, bildiğimiz her şey fizik yasalarının heryerde aynı olduğuna işaret ediyor. Dünyanın her yerinde yapılan deneyler aynı temel fiziksel açıklamalar kümesinde birleşir. Dahası, tek ve değişmez bir fiziksel ilkeler kümesini

kullanarak kozmosun çok uzak bölgelerine dair pek çok astrofiziksel gözlemi açıklayabilmemiz de, aynı yasaların her yerde geçerli *olduğunu* düşünmemize yol açıyor. Evrenin öbür ucuna hiç gitmediğimiz için, başka yerlerde tamamen yeni bir fiziğin geçerli olması ihtimalini tartışmasız bir kenara bırakamayız, fakat her şey bunun tersine işaret ediyor.

Yine de bu, evrenin farklı yerlerde aynı göründüğü -ya da aynı ayrıntılı özelliklere sahip olduğu- anlamına gelmez. Ay'da yaylı bir sopa üstünde zıplayan bir astronot, Dünya'da yapılması imkânsız birçok şeyi yapabilir. Fakat bu farklılığın Ay'ın kütlesinin Dünya'nınkinden daha az olmasından kaynaklandığını biliyoruz; yani bu kütleçekimi yasasının biryerden diğerine değiştiği anlamına gelmiyor. Newton'un, daha doğrusu Einstein'ın kütleçekimi yasası Dünya'da neyse Ay'da da odur. Astronotun deneyimlerinin farklı olması, fizik yasalarındaki bir değişiklikle değil ortamdaki detayların değişmesiyle ilgilidir.

Fizikçiler fizik yasalarının bu iki özelliğine -yani onları nerede ve ne zaman kullandığınıza bağlı olmamalarına- doğanın *simetrisi* der. Bu terimle, doğanın aynı temel yasaların geçerli olmasını sağlayarak, zamandaki her ana ve uzaydaki her yere eşit -simetrik- davranmasını kastederler. Simetri nasıl sanatta ve müzikte etkiliyse, benzer şekilde doğada da etkilidir; doğanın işleyişindeki bir düzene ve tutarlılığa ışık tutar. Fizikçilerin "güzel" terimini kullandıklarında kastettikleri şeylerden biri, basit bir evrensel yasalar kümesinden doğan zengin, karmaşık ve büyük bir çeşitlilik gösteren olguların zarafetidir.

Özel ve genel görelilik kuramlarına ilişkin tartışmalarımızda, doğanın başka simetrileriyle de karşılaşmıştık. Özel göreliliğin merkezinde yer alan görelilik ilkesinin, tek tek gözlemcilerin deneyimleyebileceği sabit hız ve doğrultudaki göreli hareketten bağımsız olarak, bütün fizik yasalarının aynı olması gerektiğini söylediğini hatırlayalım. Bu bir simetridir, çünkü doğanın bütün gözlemcilere eşit yani simetrik davrandığı anlamına gelir. Sabit hız ve doğrultuda göreli hareket halindeki gözlemcilerin hepsi, kendinin

hareketsiz olduğunu düşünmekte haklıdır. Yine bu da, göreli hareket halindeki gözlemcilerin aynı gözlemlerde bulunacağı anlamına gelmez; daha önce gördüğümüz gibi, gözlemlerinde her türden ve çok şaşırtıcı farklılıklar vardır. Yaylı sopayla zıplayan bir kişinin Dünya'da ve Ay'da farklı deneyimler yaşamasında olduğu gibi, gözlemlerdeki farklılıklar, gözlemler aynı yasalara tabi olsa da ortamdaki detayların farklı olduğunu -gözlemcilerin göreli hareket halinde olduğunu- yansıtır.

Genel görelilikteki eşdeğerlik ilkesi sayesinde Einstein, gözlemciler karmaşık ivmeli hareket halinde olsalar bile fizik yasalarının aslında bütün gözlemciler için aynı olduğunu göstererek bu simetriyi ciddi oranda genişletmişti. Einstein'ın bunu, ivmeli hareket halindeki bir gözlemcinin de kendisinin durduğunu ve hissettiği kuvvetin kütleçekimi alanından kaynaklandığını iddia etmekte gayet haklı olduğunu anlayarak başardığını hatırlayalım. Kütle çekimi çerçeveye dahil edildiğinde, bütün olası gözlem noktaları tümüyle eşittir. Bütün hareketlerin böyle eşit bir biçimde ele alınmasına içkin estetik cazibenin ötesinde, bu simetri ilkelerinin Einstein'ın kütle çekimle ilgili olarak vardığı çarpıcı sonuçlarda da merkezi bir rol oynadığını görmüştük.

Doğa yasalarının uzay, zaman ve hareketle ilgili uyması gereken başka simetri ilkeleri var mıdır? Bunun üzerine düşündüğünüzde, bir olasılık daha bulunduğunu görebilirsiniz. Fizik yasaları, gözlemlerinizi hangi *açıdan* yaptığınızı umursamamalıdır. Diyelim ki bir deney yaptınız, sonra bütün cihazlarınızı çevirip deneyi tekrar yapmaya karar verdiniz, aynı yasalar geçerli olmalıdır. Buna dönme simetrisi denir ve fizik yasalarının olası bütün *konumlar* için aynı ölçüde geçerli olduğu anlamına gelir. Daha önce tartıştığımız simetri ilkelerine uygun bir simetri ilkesidir.

Peki başkaları davar mı? Gözden kaçırmış olduğumuz bir simetri var mı? V. Bölüm'de tartıştığımız, kütle çekimsel olmayan kuvvetlerle ilişkili ayar simetrilerini ileri sürebilirsiniz. Kuşkusuz bunlar da doğadaki simetrilerdir, fakat daha soyutturlar; bizse uzay, zaman ve hareketle doğrudan bir ilişkisi olan simetrilerle ilgiliyiz. Bu koşulu

dikkate aldığınızda muhtemelen başka bir olasılık düşünemezsiniz. Aslına bakarsanız, 1967'de fizikçi Sidney Coleman ve Jeffrey Mandula, biraz önce tartıştıklarımızla birleştirilebilecek ve dünyamızla herhangi bir benzerlik taşıyan bir kuram doğurabilecek, uzay, zaman ve hareketle ilgili başka bir simetri olmadığını kanıtlamayı başarmıştı.

Ama bunun ardından, birkaç fizikçinin bu teoremi yakından incelemesi sonucunda teoremde kolayca fark edilmeyen tek bir açık olduğu ortaya çıktı: Coleman-Mandula sonucu, *spin* diye bilinen bir şeye duyarlı simetrileri tam anlamıyla kullanmıyordu.

Spin

Bir temel parçacık, örneğin bir elektron bir atom çekirdeğinin yörüngesinde Dünya'nın Güneş'in çevresinde bir yörüngede dönmesine çok benzer bir biçimde dönebilir. Fakat elektronun geleneksel nokta parçacık betimlemesinde, Dünya'nın kendi ekseni etrafında dönme hareketinin elektronun hareket tanımında yer almadığı görülecektir. Herhangi bir nesne dönerken, dönme ekseninin kendisindeki noktalar hareket etmez - dönmekte olan bir frizbinin *merkez noktası* gibi. Ama bir şey gerçekten de nokta benzeriyse, dönme ekseni olduğu söylenen yerin çevresinde "başka noktacıkları" yoktur. Bu yüzden de bir nokta nesnenin spini diye bir kavram yokmuş gibi görünecektir. Fakat uzun yıllar önce, kuantum mekaniği bu akıl yürütmeye de bir sürpriz yapmıştır.

1925'te, Hollandalı fizikçiler George Uhlenbeck ile Samuel Goudsmit, atomların yaydığı ve emdiği ışığın özellikleriyle ilgili çok miktarda kafa karıştırıcı verinin, eğer elektronların çok belirli *manyetik* özelliklere sahip olduğu varsayılırsa açıklanabileceğini fark etti. Bundan yüzyıl kadar önce, Fransız Andre-Marie Ampere, manyetizmanın elektrik yükünün hareketinden doğduğunu göstermişti. Uhlenbeck ve Goudsmit bu yoldan gittiler ve elektronun sadece tek bir belirli hareketinin, verilerin gösterdiği manyetik özelliklere yol açabileceğini buldular: *Dönme hareketi,* yani spin. Böylece Uhlenbeck ile Goudsmit klasik beklentilerin tersine,

elektronların biraz Dünyaya benzer bir şekilde *hem* bir yörüngede *hem* de kendi eksenleri etrafında döndüğünü söyledi.

Uhlenbeck ve Goudsmit, elektronun kelimenin tam anlamıyla kendi ekseni etrafında döndüğünü mü söylüyordu? Hem evet, hem hayır. Aslında çalışmaları olağan imgeye biraz benzeyen, ama doğasına kuantum mekaniği içkin olan, kuantum mekaniğine özgü bir spin kavramı bulunduğunu gösteriyordu. Bu, mikrodünyanın klasik fikirleri tazeleyen, fakat bunlara deneysel olarak doğrulanmış bir kuantum niteliği veren özelliklerinden biridir. Örneğin kendi ekseni etrafında dönmekte olan bir buz patenci düşünün; kollarını iki yana indirirse daha hızlı, açarsa dahayavaş döner. Dönme hareketine ne kadar hızlı başladığına bağlı olarak, er ya da geç yavaşlayacak ve duracaktır. Uhlenbeck ve Goudsmit'in ortaya koyduğu spin türü için böyle değildir, ikilinin yaptığı ve onlardan sonrayapılan çalışmalara göre evrendeki her elektron, her zaman ve sonsuza kadar, satir *ve hiç değişmeyen bir hızla döner.* Bir elektronun spini, şu ya da bu sebeple dönmekte olan daha tanıdık nesneler için olduğu gibi geçici bir hareket hali değildir. Bir elektronun spini, kütlesi ve elektrik yükü gibi *içkin* bir özelliktir. Bir elektronun spini olmasaydı elektron olmazdı.

Daha önceki çalışmalar elektrona odaklanmış olsa da, fizikçiler daha sonra, spinle ilgili bu fikirlerin Tablo 1.1'de verilen üç ailede yer alan bütün madde parçacıkları için de geçerli olduğunu göstermiştir. Bu durum en ince ayrıntıya dek geçerlidir: *Bütün* madde parçacıkları (ve karşı madde eşleri de) elektronun spinine eşit bir spine sahiptir. Fizikçiler meslek dilinde madde parçacıklarının hepsinin "spin-1/2'ye sahip olduğunu söyler: 1/2 değeri, kabaca elektronların ne kadar hızlı döndüğünün kuantum mekaniği açısından ölçüsüdür. Dahası fizikçiler, kütle çekimsel olmayan kuvvet taşıyıcılarının da -fotonlar, zayıf ayar bozonları ve glüonlar- içkin olarak spin özelliğine sahip olduğunu ve spinlerinin madde parçacıklarınınkinin *iki katı* olduğunu bulmuştur. Hepsinin spini "spin-1"dir.

Peki ya kütleçekimi? Sicim kuramından bile önce, fizikçiler hipoteze dayalı gravitonun kütleçekimi kuvvetinin taşıyıcısı olabilmek

için hangi spine sahip olması gerektiğini belirlemişti. Cevap: Fotonların, zayıf ayar bozonlarının ve glüonlarınkinin iki katı, yani "spin-2".

Sicim kuramı bağlamında, spin -tıpkı kütle ve kuvvet yükleri gibi- bir sicimin titreşim örüntüsüyle ilişkilidir. Nokta parçacıklarda olduğu gibi, sicimin spininin kelimenin tam anlamıyla uzayda dönmesinden doğduğunu düşünmek biraz yanıltıcı olur, yine de bu imge aklımızda tutmamız gereken bir tablodur. Bu arada, daha önce karşımıza çıkmış olan önemli bir konuyu şimdi açıklığa kavuşturabiliriz. Scherk ve Schwarz 1974'te sicim kuramının kütleçekimi kuvvetini de içeren bir kuantum kuramı olarak düşünülmesi gerektiği iddiasını ortaya attılar, çünkü sicimlerin dağarcığında *kütlesiz ve spin-2'ye* sahip -gravitonun ayırt edici özellikleri- bir titreşim örüntüsünün *mutlaka* var olduğunu bulmuşlardı. Gravitonun olduğu yerde, küdeçekimi de vardır.

Spin kavramıyla ilgili bu bilgilerin ardından, artık spinin, bir önceki kısımda bahsettiğimiz, doğadaki olası simetrilerle ilgili Coleman-Mandula sonucundaki açığı ortaya çıkarmakta nasıl bir rol oynadığına geçebiliriz.

Süpersimetri ve Süpereşler

Daha önce de vurguladığımız gibi, spin kavramı dönen bir topaç imgesine yüzeysel olarak benzese de, kökleri kuantum mekaniğine uzanan çeşitli biçimlerde, bu imgeden farklıdır. 1925'te spinin keşfedilmesiyle, tümüyle klasik bir evrende var olamayacak başka bir tür dönme hareketi olduğu da ortaya çıkmıştır.

Bu durum şu soruyu gündeme getirir: Tıpkı sıradan dönme hareketinin rotasyonal değişmezliğin simetri ilkesini ("fizik yasaları bütün uzamsal konumlar için aynı ölçüde geçerlidir") mümkün kılması gibi, acaba spinle ilişkilendirilen ve daha zor fark edilir olan dönme hareketinin doğa yasalarına özgü başka bir olası simetriye yol açması mümkün müdür? 1971'e gelindiğinde ya da önayakın bir tarihte, fizikçiler bu sorunun cevabının "evet" olduğunu göstermişti.

Hikâyenin tamamı hayli karmaşık olsa da, temel fikir şudur: Spin söz konusu olduğunda, matematiksel olarak mümkün olan *doğa yasalarına özgü bir simetri daha* vardır. Bu da *süpersimetri* olarak bilinir.

Süpersimetri, gözlem noktasındaki basit ve sezgisel bir değişiklikle ilişkilendirilemez; zamandaki, uzamsal konumdaki, açısal konumdaki ve hareketin hızındaki ve doğrultusundaki kaymalar bu olasılıkları tüketir. Fakat tıpkı spinin "kuantum mekaniğine özgü bir niteliğe sahip dönme hareketine benzemesi" gibi, süpersimetri de "uzayın ve zamanın kuantum mekaniğine özgü bir uzantısında" gözlem noktasındaki bir değişiklikle ilişkilendirilebilir. Bu ifadeler özellikle önemlidir, çünkü son cümle süpersimetrinin geniş simetri ilkeleri çerçevesinde nereye oturduğuna dair kaba bir kavrayış kazandırmayı amaçlamaktadır sadece. Her ne kadar süpersimetrinin kökenini anlamak hayli zor bir iş olsa da, kavramanın çok daha kolay olduğu başlıca *içerimlerinden* birine -doğa yasalarının süpersimetri ilkelerini içermesi halinde- odaklanacağız.

1970'Ierin başlarında fizikçiler, eğer evren süpersimetrikse doğadaki parçacıkların, spinleri birbirinden yarım birim farklılaşan *çiftler* halinde bulunması gerektiğini anlamıştı. Bu parçacık çiftlerine -nokta benzeri olarak mı (standart modelde olduğu gibi) yoksa küçük titreşen ilmekler olarak mı düşünüldüklerinden bağımsız olarak- *süpereşler* denir. Madde parçacıklarının spini spin-0, bazı haberci parçacıkların spini spin-1 olduğundan, görünüşe bakılırsa süpersimetri, madde ve kuvvet parçacıklarının eşleşmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu özelliğiyle harika bir birleştirici kavram gibi görünür. Sorun, ayrıntılardadır.

1970'lerin ortalarında, fizikçiler süpersimetriyi standart modele dahil etme çabası içindeyken, bilinen parçacıkların *hiçbirinin* -Tablo 1.1 ve 1.2'deki parçacıklar- birbirinin süpereşi olamayacağını buldular. Ayrıntılı kuramsal analizler, eğer evren süpersimetriyi içeriyorsa, o zaman bilinen bütün parçacıkların henüz keşfedilmemiş bir süpereş parçacığı olması ve o parçacığın spininin de bilinen parçacığın spininden yarım birim az olması gerektiğini gösterdi.

Örneğin elektronun spin-0'lı bir eşi olması gerekiyordu; bu varsayımsal parçacığa *selektron* dendi (süpersimetrik elektronun kısaltması). Aynı şeyin diğer madde parçacıkları için de geçerli olması gerekiyordu, örneğin nötrinoların ve kuarkların varsayımsal spin-0'lı süpereşlerine *snötrino* ve *skuark* dendi. Aynı şekilde kuvvet parçacıklarının da spin-0'lı süpereşleri olması gerekiyordu: Fotonlar için *fotinolar,* glüonlar için *glüinolar,* W ve Z bozonları için de *winolar* ve *zinolar* olması gerekiyordu.

O halde yakından bakıldığında, süpersimetri hiç ekonomik olmayan bir özellik gibi görünür; sonunda temel bileşen listesinin iki katına çıkmasına yol açan bir sürü ek parçacık gerektirmektedir. Süpereş parçacıkların hiçbiri henüz tespit edilemediğinden, Rabi'nin I. Bölüm'de bahsettiğimiz müonun keşfedilmesi hakkındaki ifadesini bir adım daha ileri götürüp "Süpersimetri sipariş eden mi oldu?" diyerek bu simetri ilkesini derhal reddetseniz haklı olursunuz. Ne var ki, fizikçiler üç sebepten dolayı süpersimetriyi üzerinde fazla düşünmeden hemen bir kenara itmek için erken olduğunu düşünmektedir. Bu sebepleri tartışalım.

Süpersimetri Savunması: Sicim Kuramı Öncesi

Öncelikle estetik bir bakış açısından, fizikçiler, doğanın matematiksel olarak mümkün simetrilerin hepsine değil de, neredeyse hepsine uyacağına inanmakta zorlanır. Elbette, simetrinin aslında eksik bir biçimde kullanılıyor olması da mümkündür, ama o zaman çok yazık olur. Sanki Bach, dâhiyane bir müzikal simetri örüntüsü ortaya çıkaracak çok sayıda sesi iç içe geçirmeyi başarmış da, son ölçüyü, bitiş ölçüsünü boş bırakmış gibi.

İkincisi, kütleçekimini göz önüne almayan bir kuram olan standart model çerçevesinde, kuantum süreçleriyle ilişkili belalı teknik konular, kuram süpersimetrik olduğunda hemen çözülmektedir. Temel sorun, her ayrı parçacık türünün, mikro düzeydeki kuantum mekaniğine özgü çılgınlığa kendine özgü bir katkıda bulunmasıdır. Fizikçiler bu çılgınlıkta, parçacık etkileşimi içeren bazı süreçlerin, *sadece* standart modeldeki sayısal parametrelerin en tehlikeli

kuantum etkilerini iptal edecek şekilde bir ince ayara -bir milyon kere milyarda birden daha hassas- tabi tutulması halinde tutarlılıklarını koruyacağını bulmuştur.

Böyle bir hassaslık, muazzam derecede güçlü bir tüfekten ateşlenen bir merminin ateşlenme açısının, mermi Ay'daki belirli bir hedefi bir amipin kalınlığından daha büyük olmayan bir hata payıyla vuracak şekilde ayarlanabilmesine benzer. Standart modelde de benzer kesinlikte sayısal değişiklikler yapılabilirse de, fizikçiler, dayandığı bir sayının ondalık noktasından sonraki on beşinci basamağında bir değişiklik olursa çökecek kadar zayıf bir kurama pek de güvenmez.

Süpersimetri bu durumu ciddi şekilde değiştirir, çünkü spinleri bir tam sayı olan parçacıklar olan *bozonların* (Hintli fizikçi Saryendra Bose'ye atfen) ve spinleri bir tam (tek) sayının yarısı kadar olan parçacıklar olan *fermiyonların* (İtalyan fizikçi Enrico Fermi'ye atfen) kuantum mekaniğine özgü katkıları birbirini iptal etme eğilimindedir. Tıpkı bir tahterevallinin iki ucu gibi, bir bozonun kuantum çalkalanmaları pozitifse, fermiyonun kuantum çalkalanmaları negatif olma eğilimindedir, bunun tersi de geçerlidir. Süpersimetri bozonlar ve fermiyonların çiftler halinde var olmasını sağladığından, daha en başta önemli birbirini iptal etme durumları -en çılgın kuantum etkilerinin bazılarını ciddi oranda yumuşatan iptaller- ortaya çıkar. *Süpersimetrik standart modelin* -bütün süpereş parçacıkların dahil edildiği standart model- tutarlılığının, artık sıradan standart modeldeki rahatsız edici derecede hassas sayısal değişikliklere dayanmadığı anlaşılmıştır. Bu son derece teknik bir konu olsa da, birçok parçacık fizikçisi, bu kavrayışın süpersimetriyi çok çekici hale getirdiğini düşünür.

Süpersimetriyi destekleyen üçüncü ikinci dereceden kanıt da *büyük birleşme* kavramından gelmektedir. Doğadaki dört kuvvetle ilgili şaşırtıcı özelliklerden biri, içkin güçleri arasındaki muazzam farktır. Elektromanyetik kuvvetin gücü, güçlü kuvvetin gücünün yüzde 1'inden daha azdır; zayıf kuvvet bundan yaklaşık 1000 kat daha güçsüzdür; kütleçekimi kuvvetiyse yüz milyon kere milyar kere milyar

kere milyar (10^{-35}) daha zayıftır. Glashow, Salam ve Weinberg'in yaptığı, elektromanyetik kuvvetle zayıfkuvvet arasında derin bir bağlantı olduğunu gösteren (V. Bölüm'de tartışmıştık) çığır açıcı ve sonunda Nobel Ödülü'ne layık bulunan çalışmanın izinden giden Glashow, 1974'te Harvardlı meslektaşı Howard Georgi'yle birlikte, benzer bir bağlantının güçlü kuvvetle de kurulabileceğini ileri sürmüştü. Dört kuvvetin üçü için bir "büyük birleşme" öneren bu çalışmanın, elektrozayıf kuramdan farklı temel bir yönü vardı. Elektromanyetik ve zayıf kuvvetler, evrenin sıcaklığı mutlak sıfırın üstünde bir milyon kere milyar dereceyken (10^{15} Kelvin) ve daha simetrik bir birleşmeden doğmuşken, Georgi ve Glashow güçlü kuvvetle olan birlikteliğin, sadece on trilyon kat daha yüksek bir sıcaklıkta -yaklaşık mutlak sıfırın üstünde on milyar kere milyar kere milyar derecede (10^{28} Kelvin)- görünür hale geleceğini göstermişti. Enerjiyi dikkate alan bakış açısına göre bu, protonun kütlesinin yaklaşık bir milyon kere milyar katıdır, yani Planck kütlesinden 10^4 daha küçüktür. Georgi ile Glashow cesur bir adım atarak kuramsal fiziği daha önce hiç kimsenin incelemeye cüret edemediği bir enerji alanına taşımışlardı.

Georgi, Helen Quinn ve Weinberg'in bu çalışmanın ardından 1974'te Harvard'da gerçekleştirdiği çalışma, kütle çekimsel olmayan kuvvetlerin büyük birleşik çerçeve içinde birleşmesi olasılığını daha da belirgin hale getirdi. Bu çalışma, kuvvetlerin birleştirilmesinde ve süpersimetrinin doğal dünyayla ilişkisinin değerlendirilmesinde hâlâ önemli bir rol oynadığından, bunun açıklanmasına biraz zaman ayıralım.

Karşıt yüklü iki parçacık arasındaki elektriksel çekimin ve büyük iki cisim arasındaki kütleçekimi kuvvetinin, nesneler arasındaki mesafe azaldıkça daha güçlü hale geldiğini hepimiz biliyoruz. Bunlar klasik fiziğin basit, herkesin iyi bildiği özellikleridir. Fakat kuantum fiziğinin kuvvetlerin güçleri üzerindeki etkisini incelediğimizde bir sürprizle karşılaşırız. Kuantum mekaniğinin neden bu güçler üzerinde herhangi bir etkisi olsun ki? Bunun da cevabı yine kuantum dalgalanmalarındadır. Örneğin bir elektronun elektrik kuvvet alanını incelediğimizde, aslında bu alanı, elektronu çevreleyen uzaydaki

anlık parçacık-karşı parçacık oluşmaları ve yok olmalarının meydana getirdiği "pusun" ardından inceliyoruz. Fizikçiler bir süre önce, mikroskobik dalgalanmaların oluşturduğu kaynaşma halindeki bu pusun, tıpkı ince bir sis tabakasının bir deniz fenerinin ışığını kısmen perdelemesi gibi, elektronun kuvvet alanının tam gücünün görülmesini engellediğini fark etti. Fakat elektrona ne kadar yaklaşırsak, perdeleyici işlevi gören parçacık-karşı parçacık pusunun içine o kadar daha fazla girmiş olacağımızı, dolayısıyla bulutun giderek azalan etkisine daha az maruz kalacağımızı unutmayın. Bu da bir elektronun elektrik alanının gücünün, biz ona yaklaştıkça *artacağı* anlamına gelir.

Fizikçiler biz elektrona yaklaştıkça elektronun gücünde meydana gelen kuantum mekaniğine özgü bu artışı, klasik fizikteki bilinen güç artışından ayırmak için, elektromanyetik kuvvetin *içkin* gücünün kısa mesafe ölçeklerinde arttığını söyler. Bu da, elektronun gücünün sadece biz ona daha yakın olduğumuz için değil, aynı zamanda elektronun içkin elektrik alanının daha büyük bir bölümü görünür hale geldiği için de arttığını gösterir. Aslına bakarsanız, her ne kadar elektrona odaklanmış olsak da, bu tartışma elektrik yüklü bütün parçacıklar için de aynen geçerlidir ve kuantum etkilerinin, kısa mesafe ölçeklerinde incelendiğinde, elektromanyetik kuvvetin gücünün artmasına neden olduğu söylenerek özetlenir.

Peki ya standart modeldeki öbür kuvvetler? Onların içkin güçleri mesafeye bağlı olarak nasıl değişir? 1973'te Princeton'dan Gross ve Frank Wilczek ile onlardan bağımsız olarak Harvard'dan David Politzer bu sorunun cevabını araştırmışlar ve şaşırtıcı bir cevap bulmuşlardı: Parçacıkların oluşması ve yok olmasının neden olduğu kuantum bulutu, güçlü ve zayıf kuvvetlerin güçlerini *büyütür.* Bu da, bu kuvvetleri kısa mesafelerde incelediğimizde, bu kaynaşan buluta daha fazla nüfuz edeceğimiz, dolayısıyla güçteki büyümeye daha az maruz kalacağımız anlamına gelir. Dolayısıyla, bu kuvvetlerin güçleri kısa mesafelerde incelendiğinde *zayıflar.*

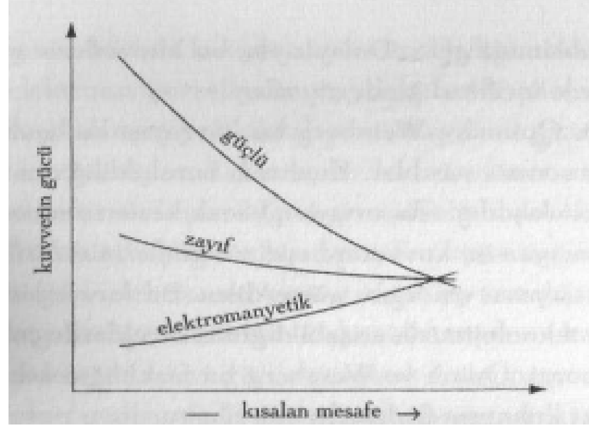
Georgi, Quinn ve Weinberg bu kavrayışı kullanarak dikkat çekici bir sonuca vardılar. Kuantum hareketliliğinin bu etkileri incelenip

anlaşıldığında, ortaya çıkacak kesin sonucun, kütle çekimsel olmayan üç kuvvetin hepsinin güçlerinin *birlikte* çalıştığının anlaşılması olacağını gösterdiler. Bu kuvvetlerin güçleri, bugünkü teknolojimizle erişebildiğimiz ölçeklerde çok farklı olsa da, Georgi, Quinn ve Weinberg bu farklılığın aslında mikro düzeydeki kuantum faaliyetlerinin oluşturduğu pusun, kuvvetlerin her biri üzerindeki farklı etkisinden kaynaklandığını öne sürdüler. Yaptıkları hesaplar, eğer bu kuvvetleri gündelik ölçeklerde değil de bir santimetrenin milyarda birinin milyarda birinin milyarda birinin yüzde biri (10^{-29}) kadar mesafelerde (Planck uzunluğunun 10 bin katı) etkili oldukları biçimiyle inceleyerek bu sise nüfuz edersek, kütle çekimsel olmayan üç kuvvetin gücünün eşit olduğunun görüleceğini gösteriyordu.

Gündelik deneyimlerin alanından hayli uzak olsa da, bu kadar küçük mesafelere duyarlı olmak için gerekli yüksek enerji, daha henüz bir saniyenin trilyonda birinin trilyonda birinin trilyonda birinin binde biri yaşındaki, fokurdayan ve sıcak evrenin ilk zamanlarının karakteristik bir özelliğiydi; o sırada evrenin sıcaklığı daha önce de belirttiğimiz gibi 10^{28} Kelvin düzeyindeydi. Bu kuramsal çalışmalar, birbirine hiç benzemeyen bileşenlerin -metal parçaları, tahta, taşlar, mineraller vs.- yeterince yüksek sıcaklıkta eriyip birleşmesi ve birörnek, homojen ve yoğun bir sıvı haline gelmesi gibi, güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetlerin hepsinin, böyle çok yüksek bir sıcaklıkta birleşip tek bir büyük kuvvet haline geldiğini ileri sürmektedir. Bu durum Şekil 7.1'de şematik olarak gösterilmiştir."

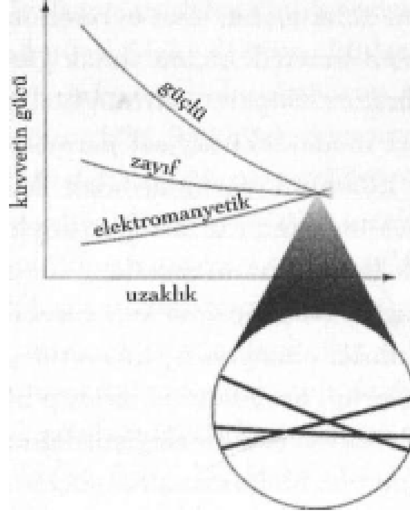
O kadar küçük mesafe ölçeklerini inceleyecek ve o kadar kavurucu sıcaklıklar yaratacak teknolojiye sahip olmasak da, 1974'ten beri deneyciler kütle çekimsel olmayan üç kuvvetin gündelik koşullar altındaki güçlerine dair yapılan ölçümleri önemli oranda rafine etmiştir. Bu veriler -yani Şekil 7.1'deki üç kuvve t-güç eğrisinin başlangıç noktaları- Georgi, Quinn ve Weinberg'in kuantum mekaniğine özgü tahminlerinde kullandıkları girdi verileridir. 1991'de CERN'den Ugo Amaldi ile Almanya'daki Karlsruhe Üniversitesinden Wim de Boer ve Hermann Fürstenau, deneylere dayalı olarak rafine edilmiş bu ölçümleri kullanarak Georgi, Quinn ve Weinberg'in tahminlerini yeniden hesapladılar ve önemli iki şey gösterdiler.

Öncelikle, kütle çekimsel olmayan üç kuvvetin güçleri. Şekil 7.2'de gösterildiği gibi, *neredeyse* tutar, ama küçük mesafe ölçeklerinde *pek* de tutmaz (eşdeğer olarak yüksek enerji/yüksek sıcaklık), İkincisi, süpersimetri işe dahil edildiğinde kuvvetlerin güçlerindeki bu küçük fakat görmezden gelinemeyecek farklılık *ortadan kalkar.* Bunun sebebi, süpersimetrinin gerektirdiği yeni süpereş parçacıkların yeni kuantum dalgalanmaları yaratması ve bu dalgalanmaların tam da kuvvetlerin güçlerini birbirine yaklaştıracak kadar olmasıdır.



Şekil 7.1 Kütle çekimsel olmayan üç kuvvetin, giderek kısalan mesafe ölçeklerinde (buna eşdeğer olarak giderek yükselen enerji süreçlerinde) hareket ederkenki güçleri

Birçok fizikçi için, doğanın kuvvetleri güçleri mikro düzeyde neredeyse birleşecek -mikro düzeyde eşit olacak- ama tam da birleşmeyecek şekilde seçtiğini düşünmek çok zordur. Son parçası biraz şekilsiz olan, yerine tam oturmayan bir yapbozun başında olmaya benzer bu durum. Süpersimetri bu son parçanın şeklini hünerli bir biçimde düzeltir, öyle ki bütün parçalar yerine oturur.



Şekil 7.2 Kuvvet güçlerinin hesaplanmasına dair rafineleştirmeler, süpersimetri olmazsa bu güçlerin neredeyse birleştiğini, ama tam olarak da birleşmediğini gösterir.

Bu son kavrayışın başka bir yönüyse, neden süpereş parçacıklardan hiçbirini keşfedemediğimiz sorusuna olası bir cevap sunmasıdır. Birkaç fizikçinin üzerinde çalıştığı başka değerlendirmelerin yanı sıra kuvvet güçlerinin birleşmesiyle sonuçlanan hesaplar, süpereş parçacıkların bilinen parçacıklardan bir hayli ağır olması gerektiğini göstermektedir. Kesin tahminlerde bulunmak mümkün olmasa da, incelemeler süpereş parçacıkların protondan en az bin kat daha ağır olması gerektiğini göstermektedir. En son teknolojilerin ürünleri olan hızlandırıcılarımız bile bu enerjilere ulaşamadığı için, bu parçacıkların henüz neden keşfedilemediği anlaşılır. IX. Bölüm'de, süpersimetrinin gerçekten de dünyamızın bir özelliği olup olmadığını yakın gelecekte belirlemeye yönelik olarak deneyler yapılması ihtimalini tartışacağız.

Süpersimetriye inanmamız -ya da en azından reddetmememiz- için bize sunulan gerekçeler elbette yüzde yüz tartışmasız değildir. Süpersimetrinin, kuramlarımızı nasıl en simetrik biçimlerine taşıdığını anlatmıştık; ama evrenin matematiksel olarak mümkün olan en simetrik biçimi almak gibi bir derdi olmadığını ileri sürebilirsiniz. Süpersimetrinin bizi önemli bir teknik sorundan, standart modeldeki sayısal parametreleri kolaylıkla fark edilemeyen kuantum

sorunlarından kaçınacak şekilde ayarlamak gibi ince bir işten kurtardığını söylemiştik; ama doğayı tanımlayan doğru kuramın, pekâlâ iç tutarlılık ile özyıkım arasındaki ince çizgide olabileceğini ileri sürebilirsiniz. Süpersimetrinin, kütle çekimsel olmayan üç kuvvetin çok küçük mesafelerdeki içkin güçlerini, nasıl tam da birleşip büyük bir birleşik kuvvet oluşturabilecekleri şekilde değiştirdiğini tartışmıştık; yine, doğanın tasarımında, bu kuvvetlerin güçlerinin mikro ölçeklerde birbirlerine tam olarak uymasını şart koşan bir şey olmadığını söyleyebilirsiniz. Son olarak, süperparçacıkların neden bulunamadığı sorusunun basit bir açıklaması olduğunu, evrenimiz süpersimetrik olmadığı için süperparçacıkların da olmadığını ileri sürebilirsiniz.

Bunlara kimse karşı çıkamaz. Fakat sicim kuramındaki rolünü düşündüğümüzde, süpersimetrinin var olduğu iddiası çok güçlenmektedir.

Sicim Kuramında Süpersimetri

Veneziano'nun 1960'ların sonunda yaptığı çalışmadan doğan ilk sicim kuramı, bu bölümün başında tartıştığımız bütün simetrileri içeriyordu, fakat o sıralarda henüz keşfedilmemiş olan süpersimetriyi kapsamıyordu. Sicim kavramına dayanan bu ilk kurama *bozonik sicim kuramı* deniyordu. Buradaki *bozonik* terimi, bozonik sicimdeki bütün titreşim örüntülerinin spinlerinin bir tam sayı olduğuna işaret eder; fermiyonik örüntüler, yani spinleri bir tam sayıdan yarım birim farklı olan örüntüler yoktur. Bu da iki soruna yol açmıştır.

Öncelikle, eğer sicim kuramı bütün kuvvetleri ve bütün maddeyi betimleyecekse, fermiyonik titreşim örüntülerini de içermesi gerekir, çünkü bilinen madde parçacıklarının hepsinin spinleri spin VVdir. İkinci ve daha sıkıntı verici sorunsa, bozonik sicim kuramında kütlesi (daha doğrusu kütlesinin karesi) *negatif olan* bir örüntü *-takiyon-* bulunduğunun anlaşılmasıydı. Sicim kuramından önce bile, fizikçiler, dünyamızın, hepsi de pozitif kütlelere sahip daha bildik parçacıkların yanı sıra *takiyon* parçacıklarına da sahip olması olasılığını incelemişlerdi, ama çabaları böyle bir kuramın mantıksal olarak

anlamlı olmasının imkânsız değilse bile zor olduğunu göstermişti. Aynı şekilde, bozonik sicim kuramı bağlamında, fizikçiler, bir takiyon titreşim örüntüsü olması gerektiği yolundaki tuhaf tahmini anlamlı kılabilmek için hayal gücüne dayalı her tür şeyi denemişlerdi, ama boşuna. Bu özellikler, ilginç bir kuram olsa da bozonik sicim kuramının temel bir eksiği olduğunu açık hale getirmişti.

1971'de, Florida Üniversitesi'nden Pierre Ramond bozonik sicim kuramını, fermiyonik titreşim örüntülerini de içerecek şekilde değiştirme işine girişti. Hem onun çalışmaları hem de Scbwarz ve Andre Neveu'nün daha sonra elde ettiği sonuçlar sayesinde sicim kuramının yeni bir versiyonu doğmaya başladı. Bu yeni kuramda bozonik ve fermiyonik titreşim örüntülerinin çiftler halindeymiş gibi görünmesi herkesi şaşırttı. Her bozonik örüntü için bir fermiyonik örüntü vardı, her fermiyonik örüntü için de bir bozonik örüntü. 1977'de Torino Üniversitesinden Ferdinando Gliozzi, Scherk ve Imperial College'dan David Olive'in çalışmalarıyla bu eşleşme aydınlatıldı. Yeni sicim kuramı süpersimetriyi içeriyordu, bozonik ve fermiyonik titreşim örüntülerinin eşleştiğinin gözlenmesi, bu hayli simetrik özelliği yansıtıyordu. Süper-simetrik sicim kuramı -yani süpersicim kuramı- doğmuştu. Dahası Gliozzi, Scherk ve Olive'in yaptığı çalışmaların çok önemli bir sonucu daha olmuştu: Bozonik sicimdeki sorun yaratan takiyon örüntüsünün süpersicimi etkilemediğini göstermişlerdi. Sicim bulmacasının parçaları yavaş yavaş yerine oturuyordu.

Bununla beraber Ramond'un ve onun yanı sıra Neveu ile Schvvarz'ın çalışmalarının başlangıçta yarattığı büyük etki aslında sicim kuramında olmamıştı. 1973 'e gelindiğinde, fizikçi Julian Wess ile Bruno Zumino, süpersimetrinin -sicim kuramının yeniden formüle edilmesinden doğan yeni simetri- nokta parçacıklara dayalı kuramlara bile uygulanabildiğini görmüşlerdi. İkili, süpersimetriyi nokta parçacıklara dayalı kuantum alan kuramına dahil etme yolunda önemli adımlar attı. O tarihlerde, kuantum alan kuramı parçacık fiziği konusunda çalışan fizikçiler arasında en çok rağbet gören konu olduğu için de -sicim kuramı giderek kenarda kalan bir konu haline gelmişti- Wess ile Zumino nun getirdiği yeni kavrayışlar, daha

sonraları *süpersimetrik kuantum alan kuramı* denecek olan alanda çok fazla sayıda araştırma başlatılmasınayol açtı. Biraz önce tartışmış olduğumuz süpersimetrik standart model, bu araştırmalardan elde edilen en büyük kuramsal başarılardan biriydi. Bugün artık, tarihin çeşitli cilvelerinden sonra, bu nokta parçacık kuramının bile sicim kuramına çok şey borçlu olduğunu görüyoruz.

1980'lerin ortalarında süpersicim kuramının yeniden canlanmasıyla birlikte, süpersimetri de ilk keşfi bağlamında yeniden doğdu. Bu çerçevede, süpersimetri savunusu, önceki bölümde sunduğumuzun da ötesine geçer. Genel görelilik ile kuantum mekaniğini birleştirmenin bildiğimiz tek yolu sicim kuramıdır. Fakat sicim kuramının da sadece süpersimetrik versiyonu, tehlikeli takiyon sorunundan kaçınmamızı sağlayan ve etrafımızdaki dünyayı oluşturan madde parçacıklarını açıklayan fermiyonik titreşim örüntülerine sahip olan kuramdır. Dolayısıyla süpersimetri, sicim kuramının kütleçekiminin kuantum kuramına ilişkin önerisi ve bütün kuvvetler ile bütün maddeyi birleştirme yönündeki büyük iddiasıyla el ele gider. Eğer sicim kuramı doğruysa, fizikçiler süpersimetrinin de doğru olmasını bekler.

Ancak 1980'lerin ortalarına kadar, özellikle sıkıntı verici bir konu süpersimetrik sicim kuramının başına bela olmuştur.

Zenginlik Başa Bela

Biri gelip de size Amelia Earhart'ın akıbetinin gizemini çözdüğünü söylerse, başta kuşkuya kapılabilirsiniz, fakat belgelere dayanan, üzerinde adamakıllı düşünülmüş bir açıklaması varsa, muhtemelen onu dinlersiniz, kimbilir belki ikna bile olursunuz. Peki ya hemen arkasından, aslında ikinci bir açıklaması daha olduğunu söylerse? Sabırla dinlersiniz ve bu açıklamanın da tıpkı ilki gibi belgelere dayandığını, iyice tartılmış olduğunu görmek sizi şaşırtır. İkinci açıklama bittikten sonra, üçüncü, dördüncü ve hatta beşinci bir açıklama daha gelir; hepsi de birbirinden farklı, ama aynı ölçüde ikna edicidir. Hiç kuşku yok ki, bütün bunların ardından, Amelia Earhart'ın gerçek akıbetini ilk başta olduğundan daha iyi bildiğinizi

düşünmezsiniz. Temel açıklamalar söz konusu olduğunda, "daha çok" kesinlikle "daha az" demektir.

1985'e gelindiğinde, sicim kuramı -yarattığı haklı heyecan bir tarafa- bizim şu fazla gayretli Earhart uzmanını andırmaya başlamıştı. Bunun sebebi de fizikçilerin 1985'te, artık sicim kuramının yapısının ana unsurlarından biri haline gelmiş süpersimetrinin, kurama bir değil *beş* farklı biçimde dahil edilebileceğini fark etmiş olmasıydı. Yöntemlerin her biri, bozonik ve fermiyonik titreşim örüntüleri eşleşmesiyle sonuçlanır, fakat bu eşleşmenin ayrıntıları ve ayrıca sonuçta ortaya çıkan kuramların çok sayıda başka özelliği ciddi farklılıklar gösterir. O kadar önemli olmasa da, bu farklı beş süpersimetrik sicim kuramının adları şöyledir: *Tip I kuramı, Tip IIA kuramı, Tip IIB kuramı, Heterotik tip 0(32) kuramı* ve *Heterotik tip EfpcEs kuramı.* Sicim kuramının bu noktaya kadar tartıştığımız bütün özellikleri bu kuramların her biri için geçerlidir; kuramlar yalnızca ince detaylarda farklılık gösterir.

Her Şeyin Kuramı sayılan bir kuramın -muhtemelen nihai bileşik kuram- beş ayrı versiyonunun bulunması sicim kuramcıları için büyük bir sıkıntı kaynağıdır. Nasıl ki Amelia Earhart'a ne olduğunun tek bir açıklaması varsa (biz bu açıklamayı bulsak da bulmasak da), dünyanın nasıl işlediğine dair en derin, en temel kavrayış için de aynısının geçerli olmasını bekleriz. Tek bir evrende yaşıyoruz, tek bir açıklama olmasını bekliyoruz.

Bu sorunun çözüm yollarından biri, beş ayrı süpersicim kuramı olsa da, bunlardan dördünün deney yoluyla elenmesi, böy-lece geriye doğru ve konuyla doğrudan ilgili tek bir açıklayıcı çerçeve kalmasının sağlanması olabilir. Fakat durum öyle bile olsa, o zaman diğer kuramlar neden var peki, sorusu içimizi kemirip duracak. Witten'ın alaycı sözleriyle "Beş kuramdan biri evrenimizi betimliyorsa, diğer dört dünyada kim yaşıyor acaba?"' Bir fizikçinin hayali, nihai cevap arayışının benzersiz, mutlak olarak kaçınılmaz ve tek bir sonuca ulaşmasıdır, ideal olan şudur: Nihai kuram -sicim kuramı ya da başka bir kuram-başka bir olasılık olmadığı için, olduğu gibi olmalıdır. Göreliliğin ve kuantum mekaniğinin temel bileşenlerini

kapsayan, mantıksal olarak sağlam tek bir kuram olduğunu keşfedecek olsay-dik, birçok kişi, evrenin neden sahip olduğu özelliklere sahip ol duğuna dair en derin kavrayışa ulaştığımızı düşünürdü. Kısaca sı bu bir birleşik-kuram cenneti olurdu.

XII. Bölüm'de göreceğimiz gibi, en son araştırmalar, beş ayrı kuramın aslında *bir tek ve aynı kapsayıcı kuramı* tanımlamanın beş ayrı yolu olduğunu göstermiş ve böylece dev bir adım atılmasını sağlayarak süpersicim kuramını bu birleşik ütopyaya biraz daha yaklaştırmıştır. Süpersicim kuramı biriciklik özelliği ne *sahiptir.*

Her şey yerine oturuyor gibi görünüyor, fakat bir sonraki bölümde de tartışacağımız gibi, sicim kuramı aracılığıyla birleşme, geleneksel bilgiden önemli bir noktada daha ayrılmayı gerektirir.

VIII. Bölüm

Göze Görünenden Daha Fazla Boyut

Einstein geçen yüzyılın en büyük bilimsel çatışmalarını önce özel, sonra da genel görelilik kuramıyla çözdü. Eintein'ın çalışmalarına konu olan problemler sonucun ne olacağına dair başlarda bir işaret vermemiş olsa da, bu çözümlerin her ikisi de uzay ve zamanı kavrayış biçimimizi tümüyle değiştirdi. Sicim kuramı ise geçen yüzyılın üçüncü büyük bilimsel çatışmasını Einstein'ın bile olağanüstü bulabileceği bir tarzda çözmekte ve uzay ve zaman anlayışımızı bir kez daha radikal bir biçimde değerlendirmemizi gerektirmektedir. Sicim kuramı modern fiziğin temellerini öyle derinden sarsmaktadır ki, evrenimizde kaç sayıda boyut olduğuna dair genel kabuller -sorgulanmasını düşünemeyeceğiniz çok temel şeyler- bile kesin ve çarpıcı bir biçiminde yıkılmaktadır.

Alışıldık Olanın Yanıltıcılığı

Deneyim sezgiyi besler. Ancak, bundan fazlasını da yapar: Deneyim, inceleme yaptığımız ve algılarımızı yorumladığımız çerçeveyi belirler. Söz gelimi, bir kurt sürüsünün yetiştirdiği "vahşi bir çocuğun" dünyayı sizinkinden epeyce farklı bir bakış açısından yorumlamasını beklersiniz kuşkusuz. Bu kadar aşırıya kaçmayan kıyaslamalara gidip farklı kültürel gelenekler içinde yetiştirilmiş insanları karşılaştırdığımızda da, bu tür kıyaslamaların deneyimlerimizin yorumlama çerçevemizi ne derecede belirlediğini vurgulamaya yaradığını görürüz.

Gelgelelim, *hepimizin* deneyimlediği belirli şeyler vardır. Saptaması ve karşı çıkılması en zor olan da, bu genel deneyimlerden kaynaklanan inanç ve beklentilerdir genellikle. Basit fakat sağlam bir örnek olarak şunu verebiliriz: Bu kitabı elinizden bırakacak olduğunuzda, bağımsız üç doğrultuda, yani birbirinden bağımsız, uzamsal üç boyutta hareket edebilirsiniz. İzlediğiniz her

yol ne kadar karmaşık olursa olsun, zorunlu olarak "sol-sağ boyutu", "ileri-geri boyutu" ve "yukarı-aşağı boyutu" diyebileceğimiz üç boyutta yapılan hareketlerin bir birleşimidir. Attığınız her adımda, bu üç boyutta ne şekilde hareket edeceğinizi belirleyen üç ayrı tercihte bulunmuş olursunuz.

Özel görelilik kuramını ele alırken karşımıza çıkan, buna eşdeğer bir ifade ise şuydu: Evrende her yer, söz konusu yer neresiyse bu uzamsal üç boyut açısından, üç ayrı veriyle tam olarak belirlenebilir. Daha aşina bir dil kullanırsak, bir kentte bir adresi, cadde ismi ("sol-sağ boyutu"ndaki yer), o caddeyi kesen bir sokak ya da bulvar ismi ("ileri-geri boyutu "ndaki yer) ve bir kat numarası ("yukarı-aşağı boyutu'ndaki yer) vererek tarif edebilirsiniz. Daha modern bir bakış açısıyla, Einstein'ın çalışmasının bizi, zamanı ayrı bir boyut olarak ("gelecek-geçmiş boyutu") düşünmeye teşvik ettiğini, böylece toplam dört boyuta sahip olduğumuzu (üç uzam ve bir de zaman boyutu) gördük. Evrendeki olayları nerede ve ne zaman meydana geldiklerini belirterek tanımlarsınız.

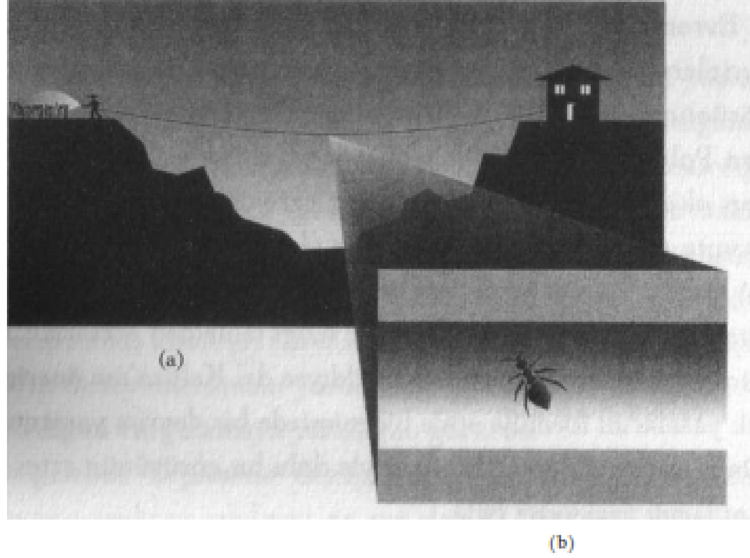
Evrenin bu yönü o kadar temel, o kadar tutarlı ve öylesine derinlere işlemiş bir özelliktir ki, gerçekten de sorgulanamaz görünür. Fakat 1919'da, Königsberg Üniversitesi'nden, az tanınan Polonyalı matematikçi Theodor Kaluza, aşikâr olana meydan okuma cesaretini gösterdi ve evrenin aslında uzamsal üç boyuta *değil,* daha *fazlasına* sahip olabileceğini ileri sürdü. Kimi zaman, kulağa aptalca gelen öneriler kuşku götürmez bir biçimde aptalcadır. Kimi zaman da fiziği temelden sarsarlar. Düşünülüp tartılması biraz zaman aldıysa da, Kaluza'nın önerisi fizik yasalarını formüle etme biçimimizde bir devrim yaratmıştır. Onun şaşırtıcı derecede önseziyle dolu bu görüşünün artçı sarsıntılarını yaşıyoruz hâlâ.

Kaluza'nın Fikri ve Klein'ın Bu Fikri Geliştirmesi

Evrenimizin üçten fazla uzamsal boyuta sahip olabileceği fikri, pekâlâ kulağa budalaca, tuhaf ya da mistik gelebilir. Oysa, gerçekte somut ve son derece aklayatkın bir iddiadır bu. Bunu görebilmek için

bir süreliğine gözümüzü evrenden çevirip daha bildik bir nesneyi, örneğin uzun ve ince bir bahçe hortumunu düşünelim.

Aşağı yukarı yüz metre uzunluğundaki bu bahçe hortumu bir vadinin üzerine gerilmiş olsun, siz de bu bahçe hortumunu Şekil 8.1 (a)'da gösterildiği gibi, yaklaşık 500 m öteden görüyorsunuz diyelim. Bu mesafeden, açılmış hortumun uzun, yatay yayılımını kolayca algılarsınız, fakat gözleriniz keskin değilse, hortumun *kalınlığını* seçmeniz zor olacaktır. Bir karınca bu hortumun üzerinde yaşamaya mahküm edilmiş olsaydı, uzaktaki bakış noktanızdan, karıncanın yürüyebileceği *bir bo*yut bulunduğunu düşünürdünüz: Hortum boyunca uzanan sol-sağ boyutu. Biri size karıncanın belli bir anda nerede olduğunu sorsaydı, ona feirveri sunma gereği görürdünüz: Karıncanın hortumun sol (ya da sağ) ucuna uzaklığı. Sonuç olarak, 500 m öteden uzun bir bahçe hortumu, tek boyutlu bir nesne gibi görünür.



Şekil 8.1 (a) Epey uzak bir mesafeden görülen bir bahçe hortumu, tek boyutlu bir nesne gibi görünür, (b) Bu görünüm büyültüldüğünde, bir daire şeklinde hortumun çevresini saran ikinci bir boyut görünür hale gelir.

Oysa gerçekte, hortumun bir kalınlığı *olduğunu* biliriz. Bunu 500 m öteden seçmekte zorlanabilirsiniz, ama bir dürbünle hortuma

odaklandığınızda. Şekil 8.1 (b)'de olduğu gibi, çevresini doğrudan görebilirsiniz. Büyültülmüş görüntüde, hortumun üzerinde yaşayan karıncanın aslında, yürüyebileceği birbirinden ayrı *iki* doğrultu olduğunu görürsünüz: Daha önce belirttiğimiz gibi hortum boyunca uzanan sol-sağ boyutu *ve* hortumun dairesel kesitindeki "saat yönü-saat yönünün tersi boyutu." Belli bir anda küçük karıncanın nerede olduğunu belirleyebilmemiz için, aslında *iki* veri sunmamız gerektiğini görüyoruz artık: Karıncanın hortumun boyu üzerinde nerede olduğu ve dairesel çevresi üzerinde nerede olduğu. Bu, bahçe hortumunun yüzeyinin ikiboyutlu olduğunu gösterir.

Yine de bu iki boyut arasında açık bir farklılık vardır. Hortumun boyuna ait doğrultu uzun, uzamış ve kolayca görülebilirdir. Hortumun kalınlığını çevreleyen doğrultu kısa, "kıvrılmış" ve görülmesi zordur. Dairesel boyutunu fark etmek için hortumu çok daha fazla bir netlikle incelememiz gerekir.

Bu örnek, uzamsal boyutların anlaşılması zor, önemli bir özelliğinin altını çiziyor: Uzamsal boyutlar iki çeşittir. Geniş, uzamış ve dolayısıyla doğrudan görülebilme özelliğine sahip olabilirler ya da küçük, kıvrılmış olup fark edilmesi daha zor olabilirler. Elbette, bu örnekte hortumun kalınlığını çevreleyen "kıvrılmış" boyutu ortaya çıkarmak için çok da büyük bir çaba harcamamız gerekmiyor. Bir dürbün kullanmamız yeter. Gelgeldim, söz konusu çok ince, bir saç teli ya da kılcal damar kadar ince bir bahçe hortumu olsaydı, kıvrılmış boyutu tespit etmek çok daha zor olurdu.

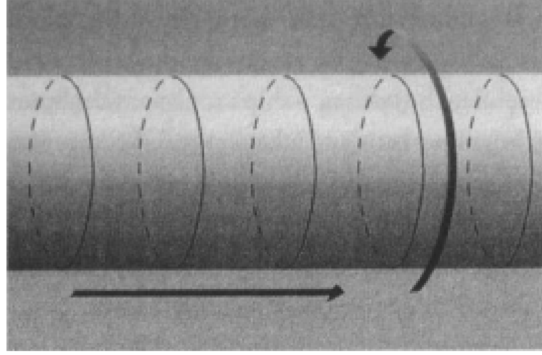
Kaluza, 1919' d a Einstein'a gönderdiği bir çalışmada şaşırtıcı bir iddiada bulunuyordu. Evrenin uzamsal dokusunun, ortak deneyimimiz olan üç boyuttan daha fazlasına sahip olabileceğini ileri sürüyordu. Onu böyle radikal bir tez ileri sürmeye iten şey, kısaca tartışacağımız gibi, tezinin, Einstein'ın genel görelilik kuramıyla Maxwell'in elektromanyetik kuramını tek bir birleşik kavramsal çerçevede bir araya getirmeye yönelik, zarif ve ikna edici bir çerçeve sunduğunu fark etmiş olmasıydı. Fakat öncelikle şunu soralım: Bu iddia, açık bir şekilde uzamsal üç boyut *gördüğümüz* gerçeğiyle nasıl bağdaştırılabilir?

Kaluza'nın çalışmasında örtülü şekilde bulunan, sonra ise İsveçli matematikçi Oskar Klein'ın 1926'da açık hale getirip geliştirdiği cevap, *evrenimizin uzamsal dokusunun hem uzamış hem de kıvrılan boyuüara sahip olabileceğidir.* Yani, tıpkı bahçe hortumunun yatay yayılımı gibi, evrenimiz de geniş, uzamış ve kolayca görünebilen boyutlara sahiptir. Ortak deneyimimiz olan uzamsal üç boyuttur bunlar. Fakat tıpkı bahçe hortumunun dairesel çevresi gibi, evrenin çok küçük bir uzamda, en incelikli deneysel cihazlarımızla bile tespit edilemeyecek kadar küçük bir uzamda sıkıca kıvrılmış başka uzamsal boyutları da olabilir.

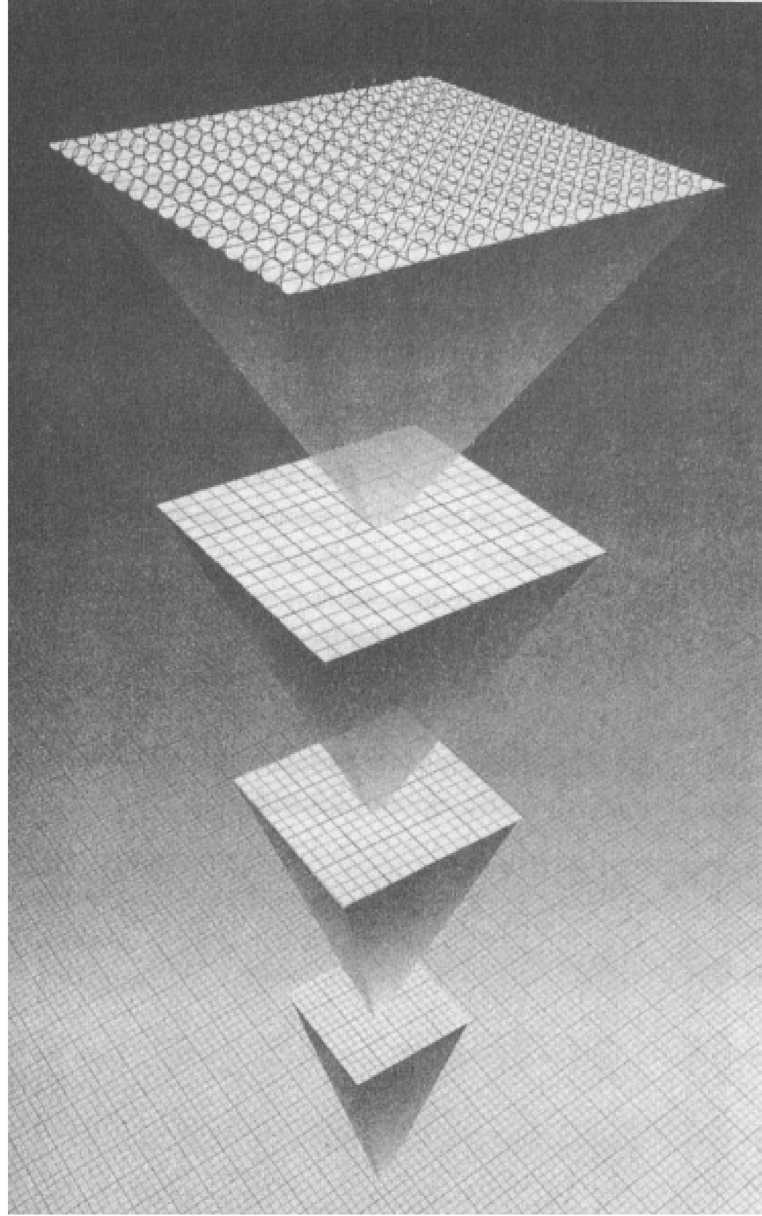
Bu olağanüstü önerinin daha net bir resmini çıkarmak için, bahçe hortumunu yeniden düşünelim. Flörtümün çevresinin çok yakın aralıklı siyah halkalarla boyalı olduğunu gözümüzde canlandıralım. Daha önce olduğu gibi, bahçe hortumu ince, tek boyutlu bir çizgi gibi görünür. Ancak, dürbünle baktığınızda kıvrılmış boyutu, boyama işleminden sonra çok daha kolay tespit edebilirsiniz ve Şekil 8.2'dekine benzer bir görüntüyü görürsünüz. Bu şekil, bahçe hortumunun yüzeyinin ikiboyutlu olduğunu göstermektedir; biri geniş, uzamış boyuttur, diğeri ise ince, dairesel boyut. Kaluza ile Klein, uzamsal evrenimizin de buna benzediğini, fakat üç tane geniş, uzamış boyutla, bir tane ince, dairesel boyut olmak üzere toplam dört uzamsal boyuta sahip olduğunu ileri sürdü. Böyle birçok boyuta sahip bir şey çizmek zordur, bu yüzden görselleştirme amacıyla iki geniş boyutu ve ince, dairesel bir boyutu birleştiren bir çizimle idare etmemiz gerekiyor. Bunu Şekil 8.3'te, uzayın dokusunu, bahçe hortumunun yüzeyine dürbünle odaklanmamıza çok benzer bir biçimde gösterdik.

Şekilde en altta yer alan görüntü, uzayın -etrafımızdaki sıradan dünyanın- görünen yapısını metre gibi, aşina olduğumuz mesafe ölçeklerinde göstermektedir. Bu mesafeler birbirini kesen, en geniş çizgi kümesiyle gösterilmiştir. Sonraki görüntülerde dikkatimizi, kolayca görülebilmeleri için aşama aşama büyültülen daha küçük bölgelere odaklayarak uzayın dokusuna yakından bakıyoruz. Başta, uzayın dokusunu kısa mesafe ölçeklerinde incelediğimizde, fazla bir şey gerçekleşmez; büyültme işleminin ilk üç aşamasında

gördüğümüz gibi, daha geniş ölçeklerde sahip olduğu temel biçimi koruyor gibi görünmektedir. Fakat Şekil 8.3'teki büyültmenin dördüncü aşamasındaki gibi uzayı en ayrıntılı şekilde inceleyerek yolculuğumuzu sürdürdüğümüzde sıkıca dokunmuş bir halıyı oluşturan dairesel ilmeklere çok benzer, yeni, kıvrımlı, dairesel bir boyut gözle görünür hale gelir. Kaluza ile Klein, bu dairesel boyutun, tıpkı bahçe hortumunun dairesel çevresinin, açılmış yatay yayılımının her noktasında bulunmasında olduğu gibi, uzamış boyutların *her* noktasında var olduğunu ileri sürüyordu. (Görsel açıklık sağlamak için, uzamış boyutlarda dairesel boyutun düzenli aralıklarla nasıl yer alacağını gösteren bir örnek çizdik sadece.) Kaluza ile Klein'ın, uzamsal dokunun ince yapısını görme biçimlerini. Şekil 8.4'te gösterdik.



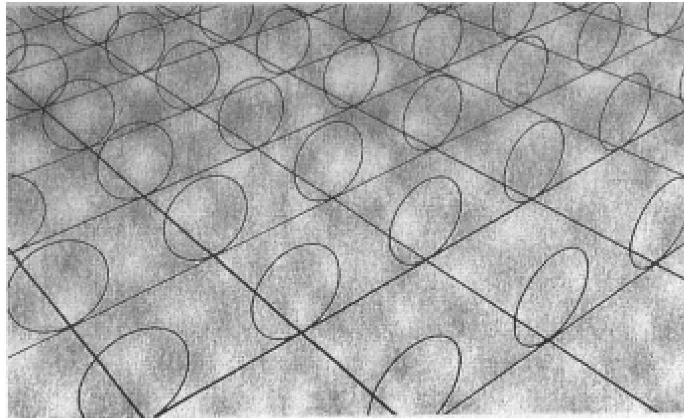
Şekil 8.2 Bahçe hortumunun yüzeyi ikiboyutludur. Boyutlardan düz okla gösterileni (yatay yay ılımı) uzun ve uzamıştır; dairesel okla gösterilen diğer boyut ise (dairesel çevresi) kısa ve kıvrılmıştır.



Şekil 8.3 Şekil 5.1'de olduğu gibi, birbirini izleyen her kademe, bir önceki kademede gösterilen uzamsal dokunun devasa boyutlarda büyültülmüş halini temsil etmektedir. Büyültmenin dördüncü aşamasında gördüğümüz gibi, bugüne kadar doğrudan gözlenememiş olmaları sonucunu doğuracak kadar küçük bir uzayda kıvrılmış olmaları koşuluyla, evrenimizde başka boyutlar da olabilir.

Bazı önemli farklılıklar bulunmasına rağmen, bahçe hortumuyla aradaki benzerlik ortadadır. Evren burada yalnızca ikisini çizdiğimiz üç uzamsal boyuta sahiptir. Bir karşılaştırma yapmak gerekirse, bir

bahçe hortumunun, örneğin, tek bir boyutu vardır. Daha da önemlisi, böylece betimlemekte olduğumuz şey, bahçe hortumu türünden evrenin *içerisinde* var olan bir nesne değil, evrenin mekânsal dokusunun ta kendisidir. Fakat temel fikir aynıdır: Bahçe hortumunun dairesel çevresinde olduğu gibi, evrenin kıvrılmış, dairesel boyutu son derece inceyse, bu boyutu belirlemek, görebildiğimiz, geniş ve uzamış boyutları belirlemekten daha zordur. Aslına bakarsanız, boyutları yeteri kadar küçükse eğer, bu dairesel boyut en güçlü büyültme cihazlarımızla bile tespit edilemeyecektir. En önemlisi, dairesel boyut, bu resmin inanmanıza yol açabileceği gibi, uzamış o bildiğimiz boyutlar içinde dairesel bir tümsekten ibaret değildir. Dairesel boyut daha çok, yeni bir boyuttur, bildiğimiz uzamış boyutların her noktasında var olan bir boyuttur; tıpkı, yukarı-aşağı, sol-sağ ve geri-ileri boyutlarının her noktada var olmasında olduğu gibi. Yeterince küçük olsa bir karıncanın hareket edebileceği yeni ve bağımsız bir doğrultudur bu. Mikrodünyaya ait böylesine bir karıncanın uzamsal konumunu belirleyebilmek için, bildiğimiz (birbirini kesen çizgilerle temsil edilen) uzamış boyutların her birinde nerede olduğunu ve ayrıca dairesel boyutta nerede olduğunu söylememiz gerekirdi. Bu durumda, uzayla ilgili dört tane bilgiye ihtiyacımız olurdu ve bunlara zamanı da eklersek, uzay-zamana dair beş tane bilgi olurdu elimizde; yani normalde olmasını bekleyeceğimizden bir fazla.



Şekil 8.4 Birbirini kesen çizgiler, ortak deneyimimiz olan uzamış boyutları temsil eder, daireler ise, yeni, ince, kıvrılmış boyutu. Bir halıyı oluşturan dairesel ilmekler gibi, bu daireler bildiğimiz uzamış

boyutların her noktasında vardır; ama görsel açıklık sağlamak adına bunları çizgilerin kesişme noktalarına yayılmış bir halde çizdik.

Böylece biraz şaşırtıcı bir biçimde, uzamış özellikte sadece uzamsal üç boyutun farkında olsak da, Kaluza ile Klein'ın akıl yürütmesi, bu durumun, kıvrılmış başka boyutların varlığını, en azından çok küçük olmaları koşuluyla engellemediğini göstermektedir. Evren pekâlâ gözle görünenden çok daha fazla boyuta sahip olabilir.

"Küçük" ne kadar küçüktür? En son teknolojinin ürünü cihazlarımız, metrenin milyarda birinin milyarda biri küçüklüğündeki yapıları tespit edebilmektedir. Bir fazladan boyut, bu küçük mesafeden çok daha küçük bir boyutta kıvrılabiliyorsa eğer, tespit edemeyeceğimiz kadar küçüktür. 1926'da Klein, Kaluza'nın başta ortaya attığı iddiayı, kuantum mekaniği alanında ortaya çıkmakta olan bazı fikirlerle birleştirdi. Klein'ın hesaplan ek dairesel boyutun Planck uzunluğu kadar kısa, yani deneysel olarak erişebileceğimizden çok daha kısa olabileceğini gösteriyordu. O zamandan beri fizikçiler, uzayda ek ince boyutların bulunması olasılığına, *Kaluza-Klein kuramı* demişlerdir.

Bir Bahçe Hortumu Üzerinde Gidişler ve Gelişler

Somut bahçe hortumu örneği ve Şekil 8.3'teki çizim, evrenimizin ek uzamsal boyutlara sahip olmasının nasıl mümkün olduğuyla ilgili bir fikir vermeyi amaçlamaktadır. Fakat bu alanda çalışan araştırmacılar için bile, uzamsal üç boyuttan daha fazla boyuta sahip bir evrenin tasavvuru hayli zordur. Bu yüzden fizikçiler -Edwin Abbott'ın 1884 tarihli, yalın bir dile sahip büyüleyici klasiği *Fladandm (Açıklamalı Düzülke *)* izinden giderek- daha az sayıda boyut olan hayali bir evrende yaşıyor olsaydık ve yavaş yavaş içinde bulunduğumuz evrenin, bilincinde olduğumuzdan daha fazla sayıda boyuta sahip olduğunu fark etseydik, yaşamın nasıl olacağı üzerine kafa yorarak sezgilerini keskinleştirmeye çalışırlar. Gelin, bizim bahçe hortumu şeklinde ikiboyutlu bir evren hayal ederek bunu deneyelim. Bunu yapabilmek, bahçe hortumunu evrenimizde bir

nesne olarak gören "dışarıdan" bakışı bir kenara bırakmanızı gerektirir. Bildiğimiz haliyle dünyayı geride bırakmalı ve sonsuz bir uzunluğu olduğunu düşünebileceğiniz çok uzun bir bahçe hortumunun, uzamsal yayılım olarak var olan *her şey olduğu* yeni bir Bahçe Hortumu evrene girmelisiniz. Farz edin ki bu evrenin yüzeyinde yaşayan küçücük bir karıncasınız.

Şimdi gelin, biraz daha aşırı uçlara yönelelim. Bahçe Hortumu evrenin dairesel boyut uzunluğunun çok kısa olduğunu düşünelim; öyle kısa ki, sizle birlikte diğer Hortum sakinleri bu boyutun farkında değilsiniz bile. Siz ve Hortum evreninde yaşayan diğer herkes yaşamın temel bir gerçeğini sorgulanamayacak ölçüde aşikâr kabul ediyorsunuz: Evrende tek *bir* uzamsal boyut vardır. (Bahçe Hortumu evren kendi karınca-Einstein'ını çıkarmış olsaydı, Hortum sakinleri evrenin bir uzamsal ve bir de zaman boyutu olduğunu söyleyeceklerdi.) Aslında, bu özellik o kadar açık, öyle sorgulanamazdır ki, Hortum sakinleri, uzamsal tek bir boyutu olduğunu açıkça belirterek, yurtlarına *Çizgiülke* demişlerdir.

Çizgiülke'de yaşam, bildiğimiz yaşamdan çok farklıdır. Örneğin, aşina olduğunuz vücut Çizgiülke'ye *uyamaz.* Vücudunuzu yeniden şekillendirmek için ne kadar çaba harcarsanız harcayın, kesinlikle sahip olamayacağınız bir şey vardır. Uzunluk, genişlik ve yükseklikle üç boyutta uzamsal olarak yer kaplayamazsınız. Çizgiülke'de böyle müsrif bir tasarıma yer yoktur. Unutmayın, zihninizdeki Çizgiülke imgesi, bizim evrenimizde var olan uzun, iplik benzeri bir nesneye bağlı olsa da hâlâ, Çizgiülke'yi gerçekten bir *evren* olarak, yani var olan her şey olarak düşünmeniz gerekiyor. Çizgiülke'nin bir sakini olarak, bu evrene uzamsal yayıhmı içinde uymanız gerekiyor. Gözünüzde canlandırmaya çalışın. Bir karıncanın vücudunu alsanız dahi, bu evrene uymayacaksınızdır. Karınca vücudunuzu, daha çok bir kurtçuğa benzeyinceye dek sıkıştırmalısınız, sonra hiç kalınlığınız kalmayıncaya dek biraz daha sıkıştırmalısınız. Çizgiülke'ye uyabilmek için *yalnızca* uzunluğa sahip bir varlık olmalısınız.

Biraz daha ileri gidip, vücudunuzun her iki ucunda bir gözünüz olduğunu düşünün şimdi de. Dönerek üç boyutta da bakabilen insan

gözlerinizden farklı biçimde, bir Çizgivarlık olarak gözleriniz ebediyen konuma kilitli kalacak, ikisi de tek boyutlu mesafeye bakıyor olacaktır. Yeni vücudunuza özgü, anatomik bir *sınırlılık* değildir bu. Siz de diğer tüm Çizgi varlıklar da Çizgiülke'de tek bir boyut olduğundan, gözlerinizin bakabileceği başka bir doğrultu olmadığını bilmektesinizdir. İleri ve geri, Çizgiülke'nin yayılımım sınırlar.

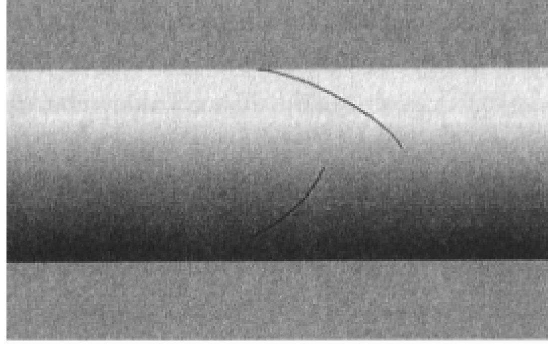
Çizgiülke'deki yaşamı gözümüzde canlandırmada biraz daha ileri gitmeyi deneyebiliriz, fakat bunu deneyince hemen fark ederiz ki, bundan daha ötesi söz konusu değildir. Örneğin, yanınızda başka bir Çizgivarlık bulunuyorsa, size nasıl görüneceğini düşünmeye çalışalım: Onun gözlerinden birini, yani size bakan gözünü göreceksinizdir, ama insanlardaki gözlerden farklı olarak, onunkiler tek bir noktacıktan ibaret olacaktır. Çizgiülke'deki gözlerin hiçbir özelliği yoktur, hiçbir duygu yansıtmazlar; bildiğimiz bu özelliklere yer yoktur, o kadar. Dahası, komşunuzun gözünün noktaya benzer bu görüntüsüne takılıp kalacaksınızdır ebediyen. Onu aşıp vücudunun öte yanında kalan Çizgiülkeyi keşfe çıkmak isteyecek olsanız, büyük bir hayalkırıklığma uğrayacaksınız demektir. *Onu aşamazsınız.* Tümüyle "yolu kapatmıştır" ve Çizgiülke'de onun etrafını dolaşmanızı sağlayacak bir yer yoktur. Çizgiülke uzamına yayıldıkları haliyle Çizgivarlıkların düzeni sabit ve değişmezdir. Ne sıkıcı!

Çizgiülke'de yüce bir varlığın görünmesini izleyen birkaç bin yılın ardından, Kaluza K. Çizgi adında bir Çizgivarhk, ezilmiş Çizgisakinlerine bir umut sunar. Artık, kutsal bir esinle ya da komşusunun nokta gözüne bakıp durmaktan büsbütün usandığından, Çizgiülke'nin tek boyutlu olmayabileceğini ileri sürer. Ya Çizgiülke, aslında ikiboyutluysa, ikinci uzay boyutu, uzamda çok ince biryayılımı olduğu için henüz doğrudan tespit edilememiş çok küçük bir dairesel doğrultuysa, diye kuramlaştınr iddiasını. Yepyeni bir yaşamın resmini çizmeye girişmektedir. Bu kıvrılmış uzay doğrultusu boyut olarak bir genişlese! Meslektaşı Çizgistein'ın yaptığı son çalışmalara bakılırsa en azından mümkün olan bir şeydir de bu. Kaluza K. Çizgi, sizi ve bütün Çizgiülke sakinlerini hayrete düşüren ve onlara ümit veren bir evren betimlemektedir. Çizgivarlıkların ikinci boyutu kullanarak birbirlerini serbestçe

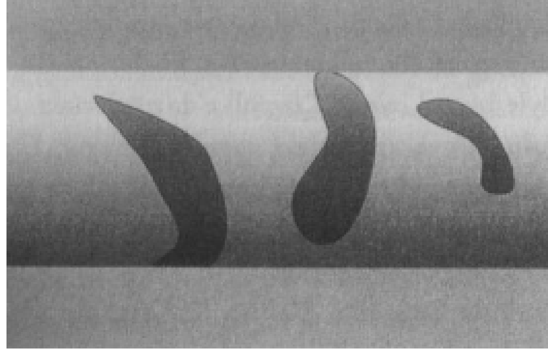
aşabilecekleri bir evrendir bu: Uzamsal esaretin sonu. Böylece, Kaluza K. Çizgi'nin, "kalınlaştırılmış" bir Bahçe Hortumu evrenindeki yaşamı betimlediğinin farkına varıyoruz.

Aslına bakarsanız dairesel boyut büyüyüp Çizgiülkeyi "şişirerek" Bahçe Hortumu evrenine çevirecek olsaydı, yaşamınız ciddi değişikliklere uğrardı. Vücudunuzu ele alın, söz gelimi. Bir Çizgivarlık olarak, iki gözünüzün arasındaki her şey vücudunuzun içini oluştururdu. Dolayısıyla sıradan insan vücudunuzda deriniz nasıl bir rol oynuyorsa, gözleriniz de çizgivücudunuzda öyle bir rol oynar. Çizgiülke'de gözleriniz, vücudunuzun içiyle dış dünya arasındaki engeli oluşturur. Çizgiülke'de bir doktor, çizgi vücudunuzun iç kısmına, ancak ve ancak yüzeyini delerek ulaşabilir, başka bir deyişle Çizgiülke'de "ameliyat" gözler üzerinden gerçekleştirilir.

Peki, şimdi de Çizgiülke, Kaluza K. Çizgi'nin ileri sürdüğü tarzda, gizli, kıvrılmış bir boyuta sahip olsaydı ve bu boyut genişleyip görülebilecek bir büyüklüğe ulaşsaydı ne olurdu, bir düşünelim. Böylece bir Çizgivarhk, vücudunuza bir açıyla bakabilir ve içini de doğrudan görebilirdi. Şekil 8.5'te gösterdiğimiz gibi. Bir doktor, bu ikinci boyutu kullanarak, açıkta olan içinize ulaşabilir, vücudunuzu ameliyat edebilirdi. Ne garip! Çizgivarlıklar zamanla, vücutlarının yenice dışa açılmış iç kısımlarını dış dünyayla temastan korumak için, şüphesiz deriye benzer bir kalkan geliştireceklerdir. Dahası, uzunluk yanı sıra genişliği olan varlıklara dönüşeceklerdir kuşkusuz: İkiboyutlu Bahçe Hortumu evrende. Şekil 8.6'da görüldüğü şekilde kayar gibi hareket eden düz varlıklar. Dairesel boyut çok büyüyecek olsaydı, bu ikiboyutlu evren Abbott'ın Düzülke'sine çok benzer bir hal alacaktı (Abbott, Düzülke'yi zengin bir kültürel mirasa, hatta hicivli bir dil kullanarak, kişinin geometrik şekline dayalı bir kast sistemine sahip bir evren olarak tasvir etmişti.) Düzülke'de ilginç şeyler olup bittiğini hayal etmek zorsa da -açıkça böyle şeylere yer yoktur- Bahçe Hortumu'nda yaşam olasılıklarla doludur. Tek olandan, gözlemlenebilir genişliği olan iki uzay boyutuna evrim çarpıcıdır.



Şekil 8.5 Çizgiülke genişleyip Bahçe Hortumu evren olduğunda, bir Çizgivarlık diğerinin vücudunun içini doğrudan görebilir.



Şekil 8.6 Bahçe Hortumu evrende yaşayan düz, ikiboyutlu varlıklar.

Şimdi, nakaratımıza geçebiliriz: Neden bu noktada durulsun ki? ikiboyutlu evrenin kıvrılmış bir boyutu olabilir, dolayısıyla bu evren bilmediğimiz üçüncü bir boyuta sahip olabilir. Şimdi, uzamış iki tane uzay boyutu *bulunduğunu* hayal ettiğimizi unutmamak koşuluyla, bunu Şekil 8.4'le gösterebiliriz (bu şekli ilk çizdiğimizde, kesişen düz çizgilerin uzamış üç boyutu temsil ettiğini düşünüyorduk). Dairesel boyut genişlerse, ikiboyutlu bir varlık kendini, hareketin uzamış boyutlarda sol-sağ ve ileri-geri olarak sınırlı olmadığı, yepyeni bir dünyada bulacaktır. Bu durumda, bir varlık üçüncü bir boyutta da hareket edebilecektir. Daire boyunca "yukarı-aşağı" doğrultusunda. Aslına bakarsanız, dairesel boyut daha da genişleyecek olsaydı, burası *bizim* üçboyutlu evrenimiz olurdu. Şimdilik uzamsal üç boyutumuzdan birinin, dışa doğru ebediyen uzayıp uzamadığını ya da aslında devasa bir daire şeklinde, en güçlü teleskoplarımızın

eriminin dışında kendi üstüne kıvrılıp kıvrılmadığını bilemiyoruz. Şekil 8.4'teki dairesel boyut yeterince büyürse -milyarlarca ışık yılı büyüklüğüne ulaşırsa- bu şekil pekâlâ bizim dünyamızın bir çizimi olabilir.

Ancak, nakaratımızı yinelemek durumundayız: Neden bu noktada durulsun ki? Bu, bizi Kaluza ile Klein'ın imgelemine götürüyor, yani üçboyutlu evrenimizin önceden bilinmeyen, kıvrılmış bir dördüncü uzamsal boyutunun olabileceği fikrine. Eğer bu çarpıcı olasılık ya da bu olasılığın, ileride kısaca ele alacağımız sayılamayacak kadar çok sayıda kıvrılmış boyuta genellenmesi doğruysa ve bu kıvrılmış boyutlar, makro boyutlarda genişleyecek olursa, ele aldığımız daha az boyutlu örnekler bildiğimiz haliyle yaşamın muazzam derecede değişeceğini açıkça ortaya koyar.

Fakat şaşırtıcıdır ki, hep böyle kıvrılmış ve küçük kalacak olsalar dahi, kıvrılmış başka boyutların var olmasının önemli anlamları vardır.

Çoklu Boyutlarda Birleşme

Kaluza'nın 1919'da ortaya attığı, evrenimizin doğrudan bildiğimizden daha fazla uzamsal boyuta sahip olabileceği iddiası başlı başına dikkat çekici bir olasılık olsa da, bu iddiayı gerçekten ilginç kılan başka bir şey vardır. Einstein, genel göreliliği uzamsal üç boyuta ve bir zaman boyutuna sahip aşina bir evren dekorunda formüle etmişti. Fakat, Einstein'ın kuramının matematiksel formelliği, başka uzamsal boyutlara sahip bir evren için benzer denklemler kaleme alacak şekilde, oldukça dolaysız olarak genişletilebilir. Kaluza, matematiksel çözümlemesini bir fazladan boyut daha olduğuna dair "ılımlı" varsayım yönünde geliştirip, açık bir şekilde yeni denklemleri türetti.

Kaluza, yeniden ele alınan formülasyon çerçevesinde, bildiğimiz üç boyutla ilgili görünen denklemlerin aslında Einstein'ın denklemlerine benzer olduğunu buldu. Fakat fazladan bir uzay boyutu daha eklediğinden, Einstein'ın başta oluşturduğundan farklı

denklemler de bulmuştu ki bu, hiç şaşırtıcı değildir. Kaluza, bu yeni boyutla ilişkilendirilen ek denklemleri inceledikten sonra, ortada hayret verici bir şey olduğunu fark etti. Ek denklemler, Maxwell'in 1880'lerde elektromanyetik kuvveti betimlerken kaleme almış olduğu denklemlerden başka bir şey değildi! Kaluza, başka bir uzay boyutu daha ekleyerek, Einstein'ın kütleçekimi kuramım Maxwell'in ışık kuramıyla birleştirmişti.

Kaluza'nın bu önerisinden önce, kütleçekimi ile elektromanyetizma birbiriyle ilgisi olmayan iki kuvvet olarak düşünülüyordu; ikisi arasında bir ilişki olabileceğini söyleyen bir ipucu dahi yoktu. Evrenimizin başka bir uzay boyutuna daha sahip olduğunu hayal etme yaratıcılığını gösteren Kaluza, gerçekten derin bir bağlantının varlığını ileri sürüyordu. Kuramı, kütleçekiminin de elektromanyetizmanın da uzayın dokusundaki dalgacıklarla ilişkili olduğunu savunuyordu. Kütle çekimi, bildik üç boyuttaki dalgacıklarla taşınıyordu, elektromanyetizma ise yeni, kıvrılmış boyutu içeren dalgacıklarla.

Kaluza, çalışmasını Einstein'a gönderdi. Einstein başta çalışmayı hayli ilginç buldu. 21 Nisan 1919'da Kaluza'ya yazdığı cevap mektubunda, "beş boyutlu [dört uzay, bir zaman boyutu] silindir bir dünya üzerinden" böyle bir birleşme sağlanabileceği fikrinin aklına hiç gelmediğini söylüyordu, "ilk bakışta, fikrinizi çok beğendim," diye de ekliyordu. Fakat bir hafta sonra Einstein, Kaluza'ya bir mektup dahayazdı. Bu kez biraz şüpheliydi: "Çalışmanızı okudum ve gerçekten de ilginç buldum. Buraya kadar çalışmanızda çürütülebilecek bir yan görmemekle birlikte, ileri sürmüş olduğunuz savların yeterince ikna edici görünmediğini de itiraf etmek zorundayım." Fakat iki yılı aşkın bir süre sonra, 14 Ekim 1921'de, Einstein Kaluza'ya bir mektup dahayazdı. Kaluza'nın ortaya koyduğu yeni yaklaşımı tam anlamıyla sindirmeye vakti olmuştu: "Kütle çekimi ile elektriğin birleşmesiyle ilgili fikrinizi yayınlamaktan sizi alıkoymamı bir kez daha düşündüm... Dilerseniz, her şeye rağmen çalışmanızı akademiye sunacağım." Geç olmuştu ama Kaluza'nın çalışmasına ustanın onay mührü vurulmuştu.

Klein'ın katkılarıyla genişletilen Kaluza'nın önerisi güzel bir fikir olsa da, ayrıntılı çalışmalar, bunun deneysel verilerle ciddi bir çatışma içerisinde olduğunu gösterdi. Elektronu kurama dahil etme yönündeki en basit girişimlerde bile, elektronun kütlesi ile yükü arasındaki ilişkiye dair tahminler, ölçülen değerlerinden çok farklı sonuçlar veriyordu. Bu sorunu aşmanın açık bir yolu yokmuş gibi göründüğünden, Kaluza'nın fikrini dikkate alan fizikçilerin birçoğu konuya ilgilerini yitirdiler. Einstein ve diğerleri, kıvrılmış başka boyutların da var olabileceği olasılığı üzerine çalışmayı sürdürdüler, ama bu çaba kısa zamanda kuramsal fiziğin kıyısında kalan bir uğraş haline geldi.

Kaluza'nın fikri gerçekten zamanının çok ilerisindeydi. 1920'ler, mikrodünyanın temel yasalarını kavramakla ilgilenen kuramsal ve deneysel fizik çalışmalarının yoğunlaştığı bir dönemin başlangıcı oldu. Kuantum mekaniğinin ve kuantum alan kuramının yapısını geliştirmeye çalışırken, kuramcıların önlerinde bir yığın iş bulunuyordu. Deneycilerin atomun ayrıntılı özelliklerini bilmelerinin yanında, önlerinde keşfedilecek başka birçok temel bileşen duruyordu. Fizikçiler yarım asır boyunca çalışmalarını ileriye götürmeye çalışırlarken kuram deneylere rehberlik etti. Deneyler ise kuramı daha rafine ve sonunda Standart Mode1'i ortaya koyacak hale getirdi. Bu verimli ve zorlu zamanlarda, fazladan boyutların varlığıyla ilgili tahminlerin epey geriden gelmiş olması pek de şaşırtıcı değildir. Fizikçiler deneysel olarak test edilebilir tahminlere yol açan güçlü kuantum yöntemlerini kullanıyorlardı; en güçlü cihazlarla dahi incelenemeyecek kadar küçük ölçeklerde bakıldığında, evrenin aslında son derece farklı biryer olabileceği olasılığına pek ilgi duyulmuyordu.

Fakat boğa piyasası er ya da geç heyecanını yitirir. 1960'ların sonları ile 1970'lerin başlarında Standart Mode1'in kuramsal yapısı oturmuş bulunuyordu. 1970'lerin sonları ile 1980'lerin başlarında Standart Mode1'in birçok tahmini deneysel olarak doğrulanmıştı ve parçacık fizikçilerinin çoğu, geri kalan tahminlerin doğrulanmasının an meselesi olduğu sonucuna varıyordu. Birkaç önemli ayrıntı

çözümsüz kaldıysa da, birçokları, güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetlerle ilgili başlıca soruların cevaplandığını düşünüyordu.

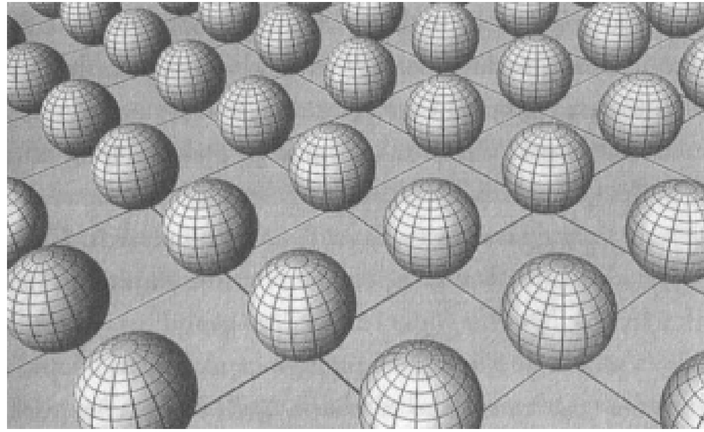
Sonunda soruların en büyüğüne, genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki esrarengiz çatışmaya dönmenin vakti geldi. Doğadaki kuvvetlerin üçüyle bir kuantum kuramı geliştirme başarısı, fizikçileri dördüncüyü, yani kütleçekimini de işe dahil etme konusunda cesaretlendirdi. Sonunda hepsi başarısızlığa uğrayan çok sayıda fikri denemiş olan fizik camiasının zihniyet yapısı, nispeten radikal yaklaşımlara daha açık hale geldi. 1920'lerin sonlarında ölüme terk edilen Kaluza-Klein kuramı da yeniden canlandırıldı.

Modern Kaluza-Klein Kuramı

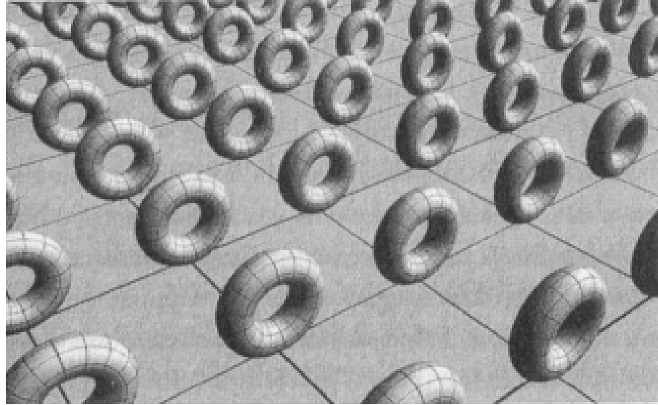
Kaluza'nın iddiasını ilk kez ortaya atmasının üstünden geçen 60 yıl içinde fizik anlayışı ciddi biçimde değişmiş ve derinleşmişti. Kuantum mekaniği tamamen açıklık kazanmış ve deneysel olarak doğrulanmıştı. 1920'lerde bilinmeyen güçlü ve zayıfkuvvetler keşfedilmiş ve büyük ölçüde kavranmıştı. Bazı fizikçiler Kaluza'nın, bu diğer kuvvetleri bilmediği için, getirdiği ilk önerinin başarısız olduğu, yine aynı sebepten uzayla ilgili yeni bakışında fazla *tutucu* bir tavır benimsediğini ileri sürüyordu. Kuvvet sayısının daha fazla olması, daha fazla boyut bulunması gerektiği anlamına geliyordu. Bir tek yeni dairesel boyutun, genel görelilik ile elektromanyetizma arasındaki bağlantıya dair ipuçlarına işaret ediyor olsa da, yeterli olmadığı savunuluyordu.

1970'lerin ortalarına gelindiğinde, yoğun bir araştırma faaliyeti yürütülüyordu. Araştırmalar çok sayıda kıvrılmış uzamsal doğrultu içeren fazladan boyutlarla ilgili kuramlar üzerine yoğunlaşmıştı. Şekil 8.7'de, bir topun, yani bir kürenin yüzeyine kıvrılan iki fazladan boyutun varlığını gösteren bir örnek görünüyor. Tek bir dairesel boyut örneğinde olduğu gibi, bu fazladan boyutlar da, bildik uzamış boyutların *her noktasına* eklenmektedir. (Görsel açıklık sağlamak amacıyla, küresel boyutların, uzamış boyutlardaki kesişme noktalarına düzenli aralıklarla yerleştirilmiş bir örneğini çizdik

sadece.) Fazladan boyutlar için farklı bir sayı önermenin ötesinde, bu boyutlar başka şekillerde de düşünülebilir. Örneğin Şekil 8.8'de yine, bu kez simit halkası şeklinde, ek iki boyutun da bulunması olasılığını çizdik. Çizim becerimizin sınırlarını aşsa da, üç, dört, beş ve aslında herhangi bir sayıda uzamsal boyutun var olduğu ve bunların kıvrılıp geniş bir ilginç şekiller yelpazesi oluşturduğu çok daha karmaşık olasılıklar hayal edilebilir. Temel koşul, bütün bu boyutların inceleyebileceğimiz en küçük ölçekten daha küçük bir uzamsal yayılıma sahip olmasıdır, çünkü şimdiye kadar hiçbir deney varlıklarını ortaya koymamıştır.



Şekil 8.7 Bir küre şeklinde kıvrılmış iki fazladan boyut.



Şekil 8.8 Bir lastik ya da simit (torus) şeklinde kıvrılmış iki fazladan boyut.

Fazladan boyutlarla ilgili öneriler arasında en ümit verici olanlar, aynı zamanda süpersimetriyi de içeren önerilerdir. Fizikçiler, süpereş parçacıkların eşleşmesiyle ortaya çıkan, en ciddi kuantum dalgalanmalarının kısmen birbirlerini iptal etmelerinin kütleçekimi kuramıyla kuantum mekaniği arasındaki çatışmaların yumuşamasını sağlayacağını umuyorlardı. Kütle çekimi, fazladan boyutlar ve süpersimetri içeren kuramları betimlemek için *çok boyutlu süperkütleçekimi* ismini ortaya attılar.

Kaluza'nın ilk girişiminde olduğu gibi, çok boyutlu süperkütleçekiminin çeşitli yorumları da başta hayli ümit verici görünüyordu. Fazladan boyutlardan kaynaklanan yeni denklemler elektromanyetizmayı, güçlü ve zayıf kuvvetleri betimlerken kullanılan denklemleri andırıyordu çarpıcı bir biçimde. Fakat ayrıntılı incelemelerde, eski bilmecelerin varlığını koruduğu görüldü. En önemlisi de, tehlikeli denecek kadar kısa mesafeli incelemelerde uzaydaki kuantum dalgalanmalarının süpersimetri sayesinde azaldığı görülüyordu, fakat anlamlı bir kurama götürecek yeterlilikte değildi bu. Fizikçiler ayrıca, kuvvetler ve maddenin tüm özelliklerini birleştiren, anlamlı ve çok boyutlu tek bir kuram bulmakta zorluk çekiyorlardı.

Birleşik bir kuramın ufak tefek parçalarının su yüzüne çıkmakta olduğu yavaş yavaş açıklık kazanıyordu, fakat tüm bunları kuantum mekaniği açısından tutarlı bir biçimde birbirine bağlayacak kritik önemde bir unsur kayıptı. 1984'te bu kayıp unsur -sicim kuramı- çarpıcı bir biçimde hikâyenin parçası ve ilgi odağı oldu.

Daha Fazla Boyut ve Sicim Kuramı

Buraya dek, evrenimizin kıvrılmış fazladan uzamsal boyutlara sahip *olabileceği* konusunda ikna olmuş olmalısınız; kuşkusuz, yeterince küçüklerse eğer, onları yok saymamızı gerektirecek bir neden yoktur. Fakat aklınıza bu fazladan boyutların hayal gücünün bir ürünü olduğu gelebilir. Metrenin milyarda birinin milyarda birinden daha küçük mesafeleri inceleyemiyor

oluşumuz, sadece ek küçük boyutların varlığı olasılığına değil, her tür tuhaf olasılığa da -örneğin miniminnacık yeşil insanların yaşadığı mikro ölçeklerde bir uygarlık olasılığı- kapı açar. Fazladan boyutların varlığıyla ilgili olasılık hiç kuşku yok ki, mikro ölçeklerde yeşil uygarlığın varlığıyla ilgili olasılığa göre daha makuldür, fakat deneysel olarak sınanmamış bu olasılıklardan birini ya da diğerini varsayma edimi, aynı derecede yapay görünebilir.

Sicim kuramı öncesinde durum böyleydi. İşte size, çağdaş fiziğin karşı karşıya olduğu temel ikilemi -kuantum mekaniği ile genel görelilik arasındaki uyumsuzluğu- çözen ve doğanın tüm temel bileşenleri ile kuvvetleri kavrayışımızı birleştiren bir kuram. Fakat sicim kuramının bunları gerçekleştirebilmesi için, evrenin fazladan boyutlara sahip olmasının *zorunlu olduğu* anlaşılmaktadır.

Bunun nedenine gelince: Kuantum mekaniğinin getirdiği başlıca kavrayışlardan biri, tahmin etme gücümüzün esasen, şu şu sonucun şu şu olasılıkla gerçekleşeceği iddiasında bulunmakla sınırlı olduğudur. Einstein, bunun modern anlayışımızın nahoş bir yönü olduğunu düşünse de, tabi siz de ona katılabilirsiniz, bu kesinlikle bir olgu gibi görünüyor. Gelin, bunu kabul edelim. Biliyoruz ki bir olayın gerçekleşme olasılığı 0 ile 1 arasındaki sayılar ya da yüzde olarak ifade edecek olursak, 0 ile 100 arasındaki sayılarla numaralandırılır. Fizikçiler, kuantum mekaniği kuramını belirli hesaplarda karmaşıklaştıran önemli bir göstergenin, bu kabul edilebilir aralıkta *yer almayan* "olasılıklar"ı sonuç vermesi olduğunu bulmuştur. Örneğin daha önce, nokta-parçacık çerçevesinde genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki yıpratıcı uyuşmazlığın bir işaretinin, hesaplarda sonsuz sayıda olasılık sonucu alınması olduğunu söylemiştik. Yine daha önce ele aldığımız gibi, sicim kuramı bu sonsuzlukları düzeltir. Fakat henüz belirtmediğimiz bir şey, geride, daha girift bir sorunun hâlâ varlığını sürdürdüğüdür. Sicim kuramının ilk günlerinde fizikçiler, bazı hesapların *negatif* olasılıkları sonuç verdiğini buldular ki bu sonuçlar da kabul edilebilir aralıktayer almaz. Bu yüzden ilk bakışta, sicim kuramı kuantum mekaniğine özgü kendi kaynar kazanında kaynıyor görünmektedir.

Fizikçiler kararlılıkla, bu kabul edilemez özelliğin nedenini araştırdılar ve bir cevaba ulaşıldı. Açıklama basit bir gözlemle başlıyordu. Bir sicim bir masanın ya da bahçe hortumunun *yüzeyi* gibi ikiboyutlu bir yüzey üzerinde uzanmakla sınırlanırsa, titreşebileceği bağımsız doğrultuların sayısı *ikiye* iner: Yüzey üzerinde sağ-sol ve ileri-geri boyutu. Yüzeyde kalan her titreşim örüntüsü, bu iki yöndeki titreşimlerin bir bileşimini içerir. Buna uygun olarak, bu söylediklerimizin Düzülke'de, Bahçe Hortumu evrende ya da ikiboyutlu başka bir evrende bir sicimin de toplamda iki bağımsız uzamsal doğrultuda titreşmekle sınırlı olduğu anlamına geleceğini görmekteyiz aynı zamanda. Fakat bir sicimin yüzeyden ayrılmasına izin verilirse, bağımsız titreşim doğrultularının sayısı da üçe çıkacaktır, çünkü bu durumda sicim yukarı-aşağı doğrultusunda da salınabilecektir. Gözümüzde canlandırmak giderek zorlaşsa da, bu örüntü uzayıp gitmektedir: Daha çok sayıda uzamsal boyutlar içeren bir evrende sicimin titreşebileceği bağımsız doğrultuların sayısı da o kadar fazladır.

Sicimlerin titreşimiyle ilgili bu olguyu özellikle vurguluyoruz, çünkü fizikçiler, sorun çıkaran hesapların bir sicimin titreşebileceği bağımsız doğrultuların sayısına son derece duyarlı olduğunu bulmuşlardı. Negatif olasılıklar, kuramın gerektirdiğiyle gerçekliğin dayatır göründüğü şey arasındaki bir *uyumsuzluktan* doğuyordu: Hesaplar, sicimler birbirinden bağımsız dokuz uzamsal doğrultuda titreşebilecek olsa, tüm negatif olasılıkların ortadan kalkacağını gösteriyordu. Kuram açısından iyi bir şeydir bu, fakat gerisi? Sicim kuramının dünyamızı uzamsal üç boyutla açıklaması bekleniyorsa, başımız hâlâ dertte demektir.

Ama, acaba böyle midir? Yarım yüzyıldan daha eski bir yolu izlediğimizde, Kaluza ile Klein'ın bir gedik açtığını görüyoruz.

Sicimler çok küçük olduklarından, yalnızca geniş, uzamış boyutlarda değil, ince ve kıvrılmış boyutlarda da titreşebilirler. Bu nedenle Kaluza ve Klein nın yaptığı gibi, bildik, uzamış üç uzamsal boyuta ek olarak diğer altı kıvrılmış uzamsal boyutun bulunduğunu varsayıp sicim kuramının *evrenimizde* dokuz uzay boyutunun

varlığını gerektirdiğini kabul edebiliriz. Böylece, fizikte kaydadeğer konular arasındaki yerini kaybetme tehlikesiyle karşı karşıya görünen sicim kuramı bu tehlikeden kurtulmuş oluyor. Bunun da ötesinde, sicim kuramı Kaluza ile Klein ve onları takip edenlerin yaptıkları gibi fazladan boyutları varsaymaktan çok, bu boyutların varlığını *gerektirmektedir.* Sicim kuramının anlamlı olabilmesi için, evrende dokuz tane uzay boyutu ve bir de zaman boyutuyla birlikte, toplam on boyut olması gerekir. Bu şekilde, Kaluza'nın 1919'daki önerisi en ikna edici ve güçlü savunmasını buluyor.

Bazı Sorular

Birçok soru çıkıyor bu durumda karşımıza. Öncelikle, sicim kuramı anlamsız olasılık değerlerinden kurtulmamız için niçin özellikle dokuz tane uzay boyutunun varlığını gerektirmektedir? Herhalde, sicim kuramında matematiksel formelliğe kapılmaksızın cevaplamakta zorlanılacak en zor sorudur bu. Basit bir sicim kuramı hesaplaması bunun cevabını vermektedir, fakat hiç kimsenin ortaya çıkan özel sayıya getirebileceği, sezgisel ve teknik olmayan bir açıklaması yok. Fizikçi Ernest Rutherford bir keresinde, özetle, bir sonucu, basit, teknik olmayan terimlerle açıklayamıyorsanız, aslında onu anlamamışsınızdır demiştir. Demek istediği şey, bulduğunuz sonucun yanlış olduğu değil, bulduğunuz sonucun kökenini, anlamını, işaret ettiklerini tam olarak anlamamış olduğunuzdur. Sicim kuramının fazladan boyutları yönüyle, bu sözlerin bir geçerliliği vardır belki de. (Aslında, gelin, fırsattan istifade bir parantez açarak, XII. Bölüm'de tartışacağımız ikinci süpersicim devriminin temel bir yönüne uzanalım. On tane uzay-zaman boyutu -dokuz tane uzay, bir tane zaman- olduğu sonucunu veren hesaplamanın *yaklaşık* olduğu anlaşılmıştır. 1990'ların ortalarında Witten, kendi görüşlerine ve Texas A&M Üniversitesi'nden Michael Duff ile Cambridge Üniversitesi'nden Chris Hull ile Paul Townsend'in çalışmalarına dayanarak yaklaşık hesaplamanın aslında bir uzay boyutunu *gözden kaçırdığı* yönünde inandırıcı kanıtlar sundu: Sicim kuramcılarının çoğunu hayrete düşürecek şekilde, sicim kuramının aslında on uzay boyutu bir de zaman boyutuyla birlikte, toplamda *on bir* boyut gerektirdiğini savundu. Bu önemli sonuca XII. Bölüm'e dek

değinmeyeceğiz, çünkü oraya kadar geliştireceğimiz malzemeyle doğrudan bir ilişkisi olmayacak bu sonucun.)

İkinci soru ise şudur: Sicim kuramının denklemleri (ya da daha açık ifadeyle, XII. Bölüm öncesindeki tartışmamıza rehberlik eden yaklaşık denklemler), evrenin dokuz tane uzay boyutu ve bir tane de zaman boyutu olduğunu gösteriyorsa eğer, neden üç uzay boyutu (bir de zaman boyutu) geniş ve uzamış, diğerleriyse küçük ve kıvrılmıştır? Neden *hepsi* geniş değildir, neden hepsi kıvrılmış değildir ya da neden bu ikisinin arasında bir olasılık söz konusu değildir? Şimdilik kimse bu sorunun cevabını bilmiyor. Sicim kuramı doğruysa, nihai olarak bunun cevabına ulaşabilecek olmamız gerekir, fakat kuramı henüz bu amaca bizi ulaştıracak denli kavramış değiliz. Bu, elbette açıklama yolunda kahramanca girişimler olmadığı anlamına gelmemektedir. Örneğin, kozmolojik bir bakış açısına göre, boyutların hepsinin de başta sıkıca kıvrılmış olduğunu, ama sonra Büyük Patlama benzeri bir patlamayla uzamsal üç boyutla bir zaman boyutunun açıldığını, bunların genişleyip bugünkü yayılmalarına ulaştığını, diğer boyutlarınsa kıvrılmış halde kaldığını düşünebiliriz. XIV. Bölüm'de tartışacağımız gibi, neden sadece üç uzay boyutunun genişlediğiyle ilgili bazı genel savlar ileri sürülmüştür, fakat doğrusunu söylemek gerekirse, bu açıklamalar henüz serpilme aşamasındadır. Bundan yola çıkarak, çevremizde gördüklerimize uygun şekilde, üç uzay boyutu dışında tüm boyutların kıvrılmış olduğunu varsayacağız. Modern araştırmanın başlıca amaçlarından biri, bu varsayımın, kuramın kendisinden doğduğunu göstermektir.

Gelelim üçüncü soruya: Çok sayıda fazladan boyutun varlığının gerekliliği göz önünde tutulursa, fazladan uzay boyutlarının varlığına karşılık fazladan *zaman* boyutlarının varlığı da mümkün müdür? Bir an düşünecek olsanız, bunun gerçekten tuhafbir olasılık olduğunu görürsünüz. Evrenin çoklu uzay boyutlarına sahip olmasının ne anlama geldiğiyle ilgili doğal bir algıya sahibizdir, çünkü sürekli çoklukla -üçle- iç içe olduğumuz bir dünyada yaşıyoruz. Peki çoklu zamanların bulunması ne anlama gelecektir? Diğer zaman biraz farkhysa eğer, zamanı halihazırda psikolojik olarak yaşamamızda olduğu gibi, onunla da mı aynı çizgideyiz demek olacaktır bu?

Kıvrılmış bir zaman boyutu düşündüğümüzde iş daha da tuhaflaşıyor. Örneğin küçük bir karınca bir daire gibi kıvrılmış ek bir uzay boyutunun etrafında dolanıyor olsa, daireleri tamamladığında hep aynı konuma geldiğini görecektir. İstersek uzaydaki aynı konuma istediğimiz sıklıkta geri dönme yeterliğine aşina olan bizlere biraz gizemli görünüyor bu durum. Peki, ya kıvrılmış boyutlardan biri zaman boyutuysa ve o boyutu geçmek kısa bir aradan sonra *zamanda önceki bir ana* dönmek anlamına geliyorsa. Bu, tabi ki deneyim alanımız dışındadır. Bildiğimiz biçimiyle zaman, mutlak bir kaçınılmazlıkla yalnızca tek bir yönde geçebileceğimiz, geçip gittikten sonra herhangi bir anına geri dönmemizin hiçbir zaman mümkün olmadığı bir boyuttur. Elbette, kıvrılmış zaman boyutları, evrenin yaratılışına gidip şimdiki ana geri dönmeyi hayal ettiğimiz, bildik geniş zaman boyutundan oldukça farklı özelliklere sahip olabilir. Ancak, fazladan uzamsal boyutların varlığı olasılığında olduğundan farklı şekilde, yeni ve önceden bilinmeyen zaman boyutlarının varlığı, açıkça, sezgimizde önemli bir yeniden yapılanmayı gerektirecektir. Bazı kuramcılar, sicim kuramına fazladan zaman boyutları dahil etme olasılığını araştırmaktadırlar, fakat henüz bu konuda bir sonuca varılmamıştır. Biz, buradaki sicim kuramı tartışmamızda, bütün kıvrılmış boyutların uzay boyutları olduğu daha "geleneksel" yaklaşıma bağlı kalacağız, fakat yeni zaman boyutlarının varlığına dair şaşırtıcı olasılık da gelecekteki gelişmelerde önemli bir rol oynayabilir.

Fazladan Boyutların Fiziksel Anlamları

Kaluza'nın ilk çalışmasından beri, yıllar süren araştırmalar göstermiştir ki, fizikçilerin varlığını ileri sürdüğü fazladan boyutların, onları henüz görmediğimiz için bizim ya da cihazlarımızın doğrudan "görebileceğinden" daha küçük olması gerekse de, gözlediğimiz fizik üzerinde önemli *dolaylı* etkileri vardır. Sicim kuramında, uzayın mikro özellikleri ile gözlediğimiz fizik arasındaki bağlantı çok açıktır.

Bunu anlayabilmek için, sicim kuramında parçacıkların kütleleri ile yüklerinin olası sicim titreşimi örüntülerine bağlı olduğunu hatırlamanız gerekir. Hareket eden ve salınan ince bir sicimi

gözünüzün önüne getirin. Titreşim örüntülerinin onun uzamsal çevresinden etkilendiğini göreceksiniz. Okyanustaki dalgaları düşünün, örneğin. Açık okyanusun engin genişliğinde, yalıtılmış dalga örüntüleri görece serbest bir biçimde oluşup şu veya bu yöne doğru yol alır. Bu, bir sicimin geniş uzamsal boyutlarda hareket ederken ortaya çıkardığı titreşim örüntülerine çok benzer. VI. Bölüm'de gördüğümüz gibi, böyle bir sicim, herhangi bir anda, uzayan doğrultulardan herhangi birinde salınma konusunda eşit derecede serbesttir. Fakat bir okyanus dalgası daha sıkışık bir uzamsal ortamdan geçerken, dalganın ayrıntılı hareket biçimi, örneğin suyun derinliğinden, karşılaşılan kayaların yeri ve şeklinden, suyun akıtıldığı kanallardan kuşkusuz etkilenecektir. Ya da bir org borusu veya korno düşünün. Bu enstrümanların her birinin çıkarabileceği ses, içlerindeki hava dalgalarının titreşim örüntülerinin doğrudan bir sonucudur. Bu örüntüleri enstrümanın içinde hava dalgalarının geçtiği uzamsal ortamın boyutları ve şekli belirler. Kıvrılmış uzamsal boyutlar bir sicimin olası titreşim örüntüleri üzerinde benzer bir etkide bulunur. Küçük sicimler, bütün uzay boyutlarında titreştiğinden, fazladan boyutların birbirine geçme ve birbirinin üzerine kıvrılma biçimleri olası titreşim örüntülerini kuvvetle etkiler ve sıkı bir şekilde sınırlar. Büyük ölçüde fazladan boyut geometrisinin belirlediği bu örüntüler, bildiğimiz uzamış boyutlarda gözlenen olası parçacık özellikleri yelpazesini oluşturur. Bu da, ortak deneyimimizin bir parçası olan, *bildik, geniş üç uzay boyutunda gözlediğimiz fiziksel özellikleri, örneğin parçacıkların kütleleri ve yüklerini fazladan boyut geometrisinin belirlediği anlamına gelir.*

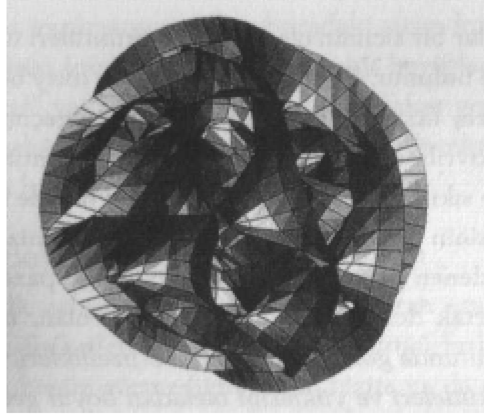
Bu, öyle derin ve önemli bir noktadır ki, bilinçli bir şekilde bir kez daha yineleyelim. Sicim kuramına göre, evren küçük sicimlerden oluşur; bu sicimlerin titreşim örüntüleri de, parçacık kütleleri ve kuvvet yüklerinin mikrodünyaya ait kaynağıdır. Sicim kuramı ayrıca, hiç görmemiş olmamızdan çıkardığımız, çok küçük boyutlarda kıvrılmış olması gereken başka uzay boyutları da gerektirir. Ama ince bir sicim, ince bir uzayı sondalayabilir. Bir sicim salınıp yol alarak hareket ederken, fazladan boyutların geometrik biçimi, titreşim örüntülerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Sicimlerin titreşim örüntüleri bize, temel parçacıkların kütleleri ve kuvvet yükleri olarak

göründüğünden, evrenin bu temel özelliklerinin, büyük ölçüde fazladan boyutların geometrik boyutları ve şekliyle belirlendiği sonucuna varırız. Sicim kuramının getirdiği en kapsayıcı ve derinlikli kavrayışlardan biri budur.

Fazladan boyutlar, evrenin temel fiziksel özelliklerini bu kadar derinden etkilediğinden, şimdi tüm enerjimizle, bu kıvrılmış boyutların neye benzediğini kavramaya çalışmalıyız.

Kıvrılmış Boyutlar Neye Benziyor?

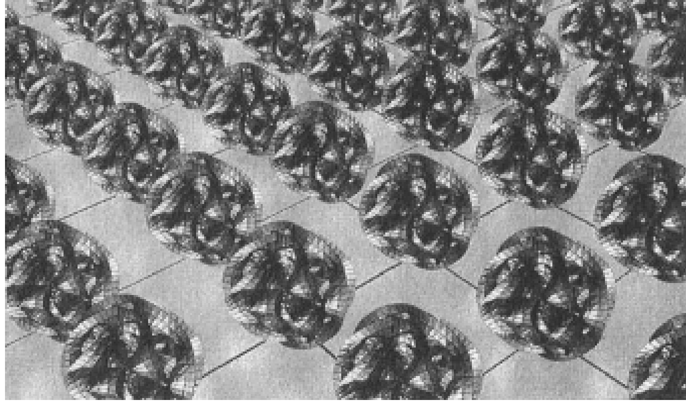
Sicim kuramındaki fazladan uzamsal boyutlar herhangi bir biçimde "kıvrılabilir" değildir; kuramdan çıkan denklemler, boyutların geometrik biçimini ciddi biçimde sınırlamaktadır.



1984'te, Austin'deki Teksas Üniversitesi'nden Philip Candelas, Santa Barbara'daki California Üniversitesi'nden Gary Horowitz ile Andrew Strominger ve Edward Witten, altı boyutlu bir geometrik şekiller grubunun bu sınırlı koşullara uyabileceğini gösterdi. Bu şekiller grubu, iki matematikçinin, Pennsylvania Üniversitesi'nden Eugenio Calabi ile Harvard Üniversitesi'nden Shing-Tung Yau'nun adıyla *Calabi-Yau uzayları* (ya da *Calabi-Yau şekilleri)* olarak bilinir. Calabi ile Yau'nun sicim kuramıyla ilgili bir bağlamda, ama sicim kuramından önce yaptıkları araştırma bu uzayları anlamamızda kilit bir rol oynamıştır. Calabi-Yau uzaylarım betimleyen matematik çok girift ve anlaşılması zor olsa da, bir resimle neye benzediklerine dair bir fikir edinebiliriz.

Şekil 8.9'da bir Calabi-Yau uzay örneği görüyoruz.’ Bu şekle bakarken, görüntünün kendine has sınırlamaları olduğunu aklınızda bulundurmalısınız, ikiboyutlu bir kâğıt parçası üzerinde, altı boyutlu bir şekli göstermeye çalışıyoruz ve bu, hatırı sayılır bir biçim yitimini beraberinde getiriyor. Yine de, resmin, bir Calabi-Yau uzayın neye benzediğine dair kabaca bir fikir verdiği söylenebilir. Şekil 8.9'daki şekil, sicim kuramıyla bilinir hale gelen fazladan boyutların getirdiği katı koşullara uyan on binlerce Calabi-Yau şekli örneğinden biridir yalnızca. Onbinlerce üyesi olan bir kulübe üye olmak çok ayrıcalıklıymış gibi gelmese de, matematiksel olasılığı olan sonsuz sayıda şekille karşılaştırınca, Calabi-Yau uzayların gerçekten de ender olduğunu anlarsınız.

Hepsini birleştirmek için şimdi, iki tane kıvrılmış boyutu temsil eden Şekil 8.7'deki yerine Calabi-Yau uzaylarını koyduğumuzu gözümüzde canlandıralım. Yani, sicim kuramı, bildiğimiz uzamış üçboyutlu evrenin her noktasında daha önceden öngörülmemiş altı tane boyut bulunduğunu ve bu boyutların Şekil 8.10'da görüldüğü gibi, sıkı bir biçimde iç içe geçmiş, karmaşık görünen bu şekillerden birini oluşturduğunu ileri sürmektedir. Bu boyutlar uzamsal dokunun ayrılmaz ve her yerde bulunan bir parçasıdır. Örneğin, elinizle geniş bir yay çizdiğinizde, sadece uzamış üç boyutta değil, bu kıvrılmış boyutlarda da hareket etmiş olursunuz. Tabi ki, kıvrılmış boyutlar çok küçük olduğundan, elinizi hareket ettirirken tekrar tekrar başlangıç noktanıza dönerek, onların çevresini defalarca dolaşırsınız. Yayılımlarının çok küçük oluşu, eliniz gibi büyük bir nesnenin hareketine yer tanımaz; öyle ki sonunda kolunuzu çevirip indirdiğinizde, kıvrılmış Calabi-Yau boyutlarında yaptığınız seyahatten tümüyle habersizsinizdir.



Şekil 8.10 Sicim kuramına göre, evren bir Calabi-Yau şekline kıvrılmış fazladan boyutlara sahiptir.

Sicim kuramının çarpıcı bir yönüdür bu. Fakat pratik düşünen biriyseniz, tartışmayı somut bir çerçeveye çekeceksinizdir kaçınılmaz olarak. Şimdi fazladan boyutların neye benzediğine dair daha fazla fikir edinmiş bulunuyoruz. Peki sicimlerin bu boyutlarda titreşmesinden doğan fiziksel özellikler nelerdir ve bu özelliklerin deneysel gözlemlerimizle karşılaştırılması nasıl sonuçlar verir? Sicim kuramının 500 milyar değerindeki sorusu budur işte.

IX. Bölüm

Dumanı Tüten Tabanca: Deneysel imzalar

Sicim kuramcılarını, dünyaya ayrıntılı, deneysel olarak sınanabilir bir öngörüler listesi sunmak kadar menınun edecek bir şey daha yoktur. Hiç kuşku yok ki, bir kuramın öngörülerini deneysel doğrulamaya tabi tutmaksızın o kuramın dünyamızı betimlediğini kabul etmeyi kural olarak yerleştirmenin bir yolu yoktur. Sicim kuramının çizdiği tablo ne kadar ikna edici olursa olsun, evrenimizi doğru bir biçimde betimlemiyorsa eğer, seçkin bir Zindanlar ve Ejderhalar oyunundan daha iler tutar bir yanı olamayacaktır.

Edward Witten, sicim kuramının çoktan, önemli ve deneysel olarak doğrulanmış bir tahminde bulunmuş olduğunu açıklamaktan büyük keyif alırdı: "Sicim kuramı, *kütleçekimi öngörmüş olmak* gibi dikkat çekici bir özelliğe sahiptir. Witten'ın bu sözlerle kastetmek istediği şuydu: Newton da Einstein da kütleçekimi kuramları geliştirdiler, çünkü Dünyaya dair gözlemleri, kütleçekimin var olduğunu, bu yüzden de geçerli ve tutarlı bir biçimde açıklanması gerektiğini onlara açıkça gösteriyordu. Oysa sicim kuramı üzerine çalışan bir fizikçi -genel görelilikten bütünüyle bihaber olsa bile- sicim kuramı sayesinde kaçınılmaz olarak kütle çekime varacaktır. Şu kütlesi olmayan, 2-spinli, graviton titreşim örüntüsü sayesinde, sicim kuramının kuramsal dokusu kütle çekimle örülmüştür. Witten'ın da söylemiş olduğu gibi, "Kütle çekimin, sicim kuramının bir sonucu olması, bugüne kadar ulaşılmış en büyük kuramsal kavrayışlardan biridir. Witten, bu "öngörü"ye, "söylem-sonrası" demenin daha doğru olacağını, çünkü fizikçilerin sicim kuramını bilmeden evvel, kütleçekimin kuramsal betimlemelerini keşfettiğini belirtirken, bunun yeryüzü tarihinde bir tesadüften ibaret olduğuna işaret ediyor. Witten, hayal dünyamızı canlandırırken, evrendeki başka ileri medeniyetlerde önce sicim kuramının keşfedilmiş, sonrasında çarpıcı bir sonuç olarak kütleçekimi kuramının bulunmuş olmasının pekâlâ mümkün olabileceğini savunuyor.

Bizler gezegenimizdeki bilim tarihine bağlıyız ya, bu kütleçekimi söylem-sonrasının sicim kuramını inandırıcı bir biçimde deneysel olarak doğrulayamadığını söyleyen de birçok kişi var. Şu iki şeyden biri, fizikçilerin çoğunu menınun ederdi: Sicim kuramının, deneycilerin doğrulayabileceği çok iyi bir öngörüde bulunması ya da Dünya'nın halihazırda bir açıklaması bulunmayan bir özelliğine (elektronun kütlesi ya da üç parçacık ailesinin varlığı gibi) dair bir söylem-sonrası sunması. Bu bölümde, sicim kuramcılarının bu amaçlara ulaşma doğrultusunda ne kadar yol aldıklarını tartışacağız.

İroniktir, sicim kuramının, fizikçilerin bugüne dek üzerinde çalışmış olduğu en güçlü öngörülerde bulunma potansiyeline sahip olduğunu -doğanın en temel özelliğini açıklama kapasitesine sahip bir kuram olduğunu- görecek olsak da, fizikçiler henüz deneysel verilerin karşısına çıkaracak kesinlikte öngörülerde bulunmayı başaramamışlardır. Yılbaşında da hayallerini süsleyen armağana kavuşan, ama kullanma kılavuzunda birkaç sayfa eksik olduğu için bir türlü yeni oyuncağını çalıştıramayan bir çocuk gibi, günümüz fizikçileri de pekâlâ modern bilimin Kutsal Kâse'sini ellerinde tutuyor, fakat kullanma kılavuzunu tamamen *yazmayı* başarmadan onun öngörme gücünü tam anlamıyla harekete geçiremeyecek durumda bulunuyor olabilirler. Yine de bizler bu bölümde tartışmamızı sürdürürken, biraz şans yaver giderse eğer, sicim kuramının temel özelliklerinden biri gelecek on yıl içinde deneysel olarak doğrulanabilir. Daha da büyük bir şans eseri, kuramın dolaylı izleri de her an doğrulanabilir.

Çapraz Ateş

Sicim kuramı doğru mudur? Bilmiyoruz. Fizik yasalarının büyük olana hükmeden yasalarla, küçük olana hükmeden yasalar olarak bölünmemesi gerektiği inancını paylaşıyorsanız, uygulanabilme çapı sınırsız olan bir kuram buluncaya kadar rahat etmememiz gerektiğine inanıyorsanız, elimizde sadece sicim kuramı var. Yine de, bunun sicim kuramının benzersiz nitelikte temel bir özelliğinden çok, yalnızca fizikçilerin hayal güçlerinin zayıflığını yansıttığını savunabilirsiniz tabü. Belki de öyledir. Kaybettiği anahtarlarını

yalnızca sokak lambasının altında arayan adamın hikâyesinde olduğu gibi, yalnızca ve yalnızca bilim tarihinin yolundan çıkması bir tesadüf eseri bu yöne bir parça ışık düşürmüş olduğu için fizikçilerin sicim kuramının başına üşüşmüş olduğunu da savunabilirsiniz. Kim bilir, belki dediğiniz gibidir. Nispeten muhafazakâr biriyseniz ya da şeytanın avukatını oynamaya bayılan biriyseniz eğer, fizikçilerin, doğanın, doğrudan deneysel olarak inceleyebileceğimiz bir şeyden yüz milyonlarca milyar kez küçük, yeni bir özelliğini ortaya koyan bir kurama vakit harcamaktan başka bir işi olmadığını dahi söyleyebilirsiniz.

Bu şikâyetleri, 1980'lerde sicim kuramının ilk çıkışını yaptığı yıllarda dile getirmiş olsaydınız, zamanımızın en saygın fizikçilerinden bazıları da size katılırdı. Mesela, 1980'lerin ortalarında Nobel Ödüllü Harvard'lı fizikçi Sheldon Glashow, yine o dönemde Harvard'da çalışan fizikçi Paul Ginsparg'le birlikte, sicim kuramını deneysel olarak erişilebilir olmaması yüzünden açıkça aşağılamıştı:

Süpersicim kuramcıları, kuram ile deney arasındaki geleneksel karşılaşma, yüzleşme yerine, bir iç uyumun, zarafet, benzersizlik ve güzelliğin hakikati tanımladığı bir iç uyumun peşinden gidiyor. Bu kuramın var oluşu, büyülü rastlantılara, mucizevi birbirini iptal etmelere ve görünürde birbiriyle ilgisiz olan (muhtemelen de keşfedilmemiş) matematik alanları arasındaki ilişkilere dayanıyor. Bu özellikler, süpersicimlerin gerçekliğini kabul etmenin gerekçesi olabilir mi? Matematik ve estetik, salt deneyin yerini tutup onu aşabilir mi?

Glashow başka bir yerde de şunları söylemişti:

Süpersicim kuramı o kadar iddialıdır ki, ya topyekün doğru olabilir ya da topyekün yanlış. Tek sorun, matematiğinin gelecek nesillerde de sırrına eremeyeceğimiz kadar yeni ve zor olmasıdır.

Glashow, "sicim kuramcılarına fizik bölümlerince maaş ödenmesi ve kolay etki altında kalabilecek öğrencileri yoldan çıkarmalarına izin verilmesi" gerekip gerekmediğini sorgulayacak kadar ileri gitmiş,

sicim kuramının ortaçağlarda ortaçağ teolojisinin yaptığına çok benzer bir biçimde bilimi baltaladığı uyarısında bulunmuştu.

Richard Feynman da, ölmeden kısa bir süre önce, sicim kuramının kütleçekimi ile kuantum mekaniğinin uyumlu bir biçimde birleştirilmesini engelleyen bütün sorunların -özellikle de sonsuz sonucunu veren o tehlikeli cevapların- tek çaresi olduğuna inanmadığını açıkça dile getirmişti:

"Bir işi becermenin tek yolu olmadığını düşünmüşümdür hep, yanılıyor da olabilirim. Sonsuzluklardan kurtulmanın tek bir yolu olduğunu düşünmüyorum. Bir kuramın sonsuzluklardan kurtulmuş olması, onun benzersizliğine inanmak için bence yeterli bir gerekçe değil."

Glashow'un Harvard'dan meslektaşı ve çalışma arkadaşı Howard Georgi de 1980'lerin sonlarında sicim kuramına veryansın ediyordu:

"Deneyci dostlarımızın bize yardımcı olamayacağı kadar küçük mesafelerdeki "nihai" birleşmenin siren sesleriyle baştan çıkmaya göz yumarsak eğer, başımız belada demektir, çünkü fiziği insanların o kadar da ilginç olmayan başka faaliyetlerinden ayıran o önemli süreci, ilgisiz fikirlerin ayıklanması sürecini kaybedeceğiz."

Büyük önem taşıyan birçok meselede olduğu gibi, bu "hayır" korosunun karşısında bir de şevkli bir destek korosu vardı. Witten, sicim kuramının kütleçekimi ile kuantum mekaniğini nasıl birleştirdiğini öğrendiğinde, hayatının "en büyük entelektüel heyecanını" duyduğunu söylemişti. Harvard Üniversitesi'ndeki önde gelen sicim kuramcılarından Cumrun Vafa, "sicim kuramının, evrene dair bugüne kadar ulaştığımız en derin kavrayışı kesinlikle ortaya koyduğunu" söylemişti.’ Nobel Ödüllü fizikçi Murray Gell-Mann da sicim kuramının "fantastik bir şey" olduğunu, bir gün sicim kuramının bir versiyonunun bütün dünyanın kuramı olmasını umduğunu söylemişti.

Gördüğünüz gibi, tartışma kısmen fizikten, kısmen de fiziğin nasıl yapılması gerektiğiyle ilgili farklı felsefelerden beslenmektedir.

"Gelenekçiler" kuramsal çalışmanın deneysel gözlemlere yakından bağlı olmasını, bu gözlemlerin de, büyük ölçüde, geçen birkaç yüzyılda başarılı olan araştırma tarzında yürütülmesini istemektedir. Fakat başkaları, halihazırdaki teknolojik beceerimizle doğrudan sınayamayacağımız meseleleri ele almaya hazır olduğumuz kanısındadır.

Farklı felsefeler bir tarafa, sicim kuramına yöneltilen eleştirilerin büyük bölümü geçen on yıl içinde yatışıp durulmuş, dibe çökmüştür. Glashow bunu iki şeye bağlıyor. Öncelikle 1980'lerin ortalarına dair şunları söylüyor:

Sicim kuramcıları şevkle, coşkuyla fiziğin bütün sorularını kısaca cevaplayabileceklerini iddia ediyorlardı. Coşkuları bir sağgörü kazandığı için, 1980'lerdeki eleştirilerimin büyük bölümü de artık geçerli değildir."

İkinci olarak da şuna işaret ediyor:

Biz, sicim kuramı dışındaki kuramcılar, son on yılda ilerleme namına hiçbir şey yapamadık. Dolayısıyla sicim kuramının tek kuram olduğu savı çok güçlü bir sav. Geleneksel kuantum alan kuramı çerçevesinde cevaplanamayacak sorular var. Bu kadarı açık. Başka bir şeyle açıklanabilirler, bildiğim tek şey de sicim kuramı.

Georgi de 1980'ler üzerine çok benzer şeyler düşünüyor:

"İlk yıllarında çeşitli kereler, sicim kuramı fazla göklere çıkarılıp pazarlandı. Sonraki yıllarda sicim kuramının bazı fikirlerinin fizikle ilgili olarak ilginç biçimlerde düşünmeye yol açtığını gördüm, ki bu düşünme biçimleri çalışmalarımda bana da yararlı oldu. İnsanların sicim kuramına vakit ayırdığını görmekten şimdi daha menınunum, çünkü artık sicim kuramından nasıl yararlı bir şey çıkabileceğini görüyorum."

Hem geleneksel fizikte hem sicim fiziğinde önde gelen isimlerden biri olan kuramcı David Gross, durumu şu şekilde zarifçe toparlamış:

"Sanki Doğa Dağı'na tırmanıyorduk da, başı deneyciler çekiyordu. Biz tembel kuramcılar arkada kalıyorduk. Deneyciler, arada kafalarımıza deneysel bir taş atarlardı, kafamıza inen taşla nihayetinde meseleyi çakar, onların açtığı yola girerdik. Arkadaşlarımıza kavuştuğumuzda onlara manzaranın nasıl olduğunu, oraya nasıl vardıklarını açıklardık. Bu, Doğa Dağı'na tırmanmanın eski ve kolay yoluydu (en azından kuramcılar için). Hepimiz o eski günlerin geri gelmesini istiyoruz. Fakat artık biz kuramcıların başı çekmesi gerekiyor. Bu daha yalnız bir yolculuk olacak."

Sicim kuramcıları, Doğa Dağı'nın zirvelerine tek başlarına tırmanmaya can atmıyor; bu yükü ve bu heyecanı deneyci meslektaşlarıyla paylaşmayı onlardan çok istiyorlar. Yalnızca mevcut durumda teknolojik bir uyumsuzluk -tarihi bir asenkron- söz konusu; zirveye yapılacak tırmanışın kuramsal ipleri ve ayakkabıları en azından kısmen belirlenmiş, deneysel ipler ve ayakkabılarsa henüz ortadayok. Fakat bu, sicim kuramının deneyden temelden ayrıldığı anlamına *gelmiyor.* Sicim kuramcıları son derece-yüksek-enerji zirvesinden daha aşağılardaki bir kampta çalışan deneycilerinin kafasına "kuramsal bir taş atabilme" konusunda büyük ümitler besliyor. Sicim kuramı çerçevesinde bugün süren araştırmaların başlıca hedeflerinden biridir bu. Henüz, dağın zirvesinden, aşağıya atılabilecek taşlar koparılabilmiş değil, fakat biz bunları tartışırken, hayret ve ümit verici birkaç çakıl koparılmış olacak kuşkusuz.

Deneye Giden Yol

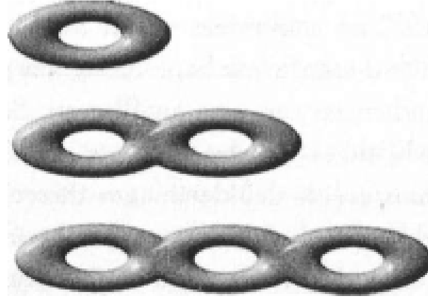
Devasa teknolojik atılımlar olmazsa eğer, bir sicimi doğrudan görmek için gerekli küçük ölçeklere odaklanmamız asla mümkün olmayacak. Fizikçiler bir metrenin milyarda birinin milyarda biri ölçeğini, kabaca birkaç kilometre uzunluğundaki hızlandırıcılarla inceleyebiliyor. Daha küçük ölçekleri incelemek daha fazla enerji gerektiriyor, bu da bu enerjiyi tek bir parçacığa odaklayabilecek daha büyük makineler anlamına geliyor. Planck uzunluğu, bugün erişebileceğimiz ölçekten 1(H’ daha küçük olduğundan, bugünün teknolojisini kullanacaksak eğer, tek tek sicimleri görebilmek için

galaksi büyüklüğünde bir hızlandırıcıya ihtiyacımız var demektir. Aslına bakarsanız Tel Aviv Üniversitesi'nden Shmuel Nussinov, doğrudan ölçeklemeye dayanan bu kaba tahminin hayli iyimser olduğunu göstermiştir; Nussinov'un titiz çalışması, bütün *evren* boyutlarında bir hızlandırıcıya ihtiyacımız olduğuna işaret ediyor. (Maddeyi Planck uzunluğu ölçeğinde incelemek için gereken enerji kabaca bin kilovat saate eşittir- ki bu da ortalama bir klimayı yaklaşık 100 saat çalıştırdığınızda harcanan enerjiye denktir- çok da fazla görünmüyor, ama görünürde aşılamayacak asıl teknolojik mesele bütün bu enerjiyi tek bir parçacığa, yani tek bir sicime odaklamaktır.) ABD Kongresi'nin Süperiletken Süperçarpıştırıcı -çevresi "sadece" 86,90 kilometre olan bir hızlandırıcı- için finansmanı sonunda iptal etmesine bakılırsa, Planck ölçeği hızlandırıcısı için para çıkmasını beklerken ruhumuzu teslim edebiliriz. Sicim kuramını deneysel olarak test edeceksek, bu dolaylı bir biçimde yapılmalı. Sicim kuramının, bir sicimin boyutundan çok daha büyük olan ölçeklerde gözlenebilecek fiziksel sonuçlarını belirlememiz gerekiyor.“

Candelas, Horowitz, Strominger ve Witten çığır açıcı makalelerinde, bu amaç doğrultusunda ilk adımları attılar. Sicim kuramındaki başka boyutların bir Calabi-Yau şeklinde kıvrılması gerektiğini bulmakla kalmayıp bunun sicim titreşimlerinin olası örüntüleri üzerindeki bazı sonuçlarını da incelediler. Buldukları temel sonuçlardan biri, sicim kuramının, parçacık fiziğinin uzun zamandır sürüncemede kalmış sorunlarına getirdiği hayret verici derecede beklenmedik çözümleri aydınlatıyor.

Fizikçilerin bulduğu temel parçacıkların, benzer bir örgütlenmeye sahip üç aileye bölündüğünü, parçacık kütlelerinin birinci aileden üçüncü aileye doğru gidildikçe arttığını hatırlayalım. Sicim kuramından önce hiçbir cevap getirilemeyen soru, neden *aileler* var, neden *üç tane* aile var sorularıydı. İşte sicim kuramının çözüm önerisi: Tipik bir Calabi-Yau şeklinde, bir fonograf plağının ortasındakine benzer delikler vardır ya da Şekil 9.1'de görüldüğü üzere bir simidin ya da "çoklu bir simidin" ortasındakine benzer delikler. Çok boyutlu Calabi-Yau bağlamında, aslına bakarsanız çok farklı tipte delikler -farklı boyutlara sahip olabilen delikler ("çok

boyutlu delikler")- ortaya çıkabilir. Fakat Şekil 9.1 anafikri veriyor. İşte Candelas, Horowitz, Strominger ve Witten, bu deliklerin olası sicim titreşim örüntüleri üzerindeki etkisini yakından incelediler. Bakın ne buldular: Calabi-Yau şeklindeki her delikle ilişkili bir "en düşük enerjideki sicim titreşimleri ailesi" vardır. Temel parçacık ailelerinin en düşük enerjideki salınım örüntülerine tekabül etmesi gerektiğinden, birden çok deliğin olması -çoklu simitte olduğu gibi sicim titreşim örüntülerinin çok sayıda aileye ayrılması anlamına gelecektir. Kıvrılmış Calabi-Yau'nun üç deliği varsa, bu durumda üç temel parçacık ailesi buluruz.“ Böylece sicim kuramı, deneysel olarak gözlenen aile örgütlenmesinin, tesadüfi ya da ilahi, açıklanamaz bir özellik olmak yerine, başka boyutları oluşturan geometrik delik sayısının bir yansıması olduğunu iddia etmektedir! İşte bu, bir fizikçinin kalbini durduracak türden bir sonuçtur. Planck ölçeğinde kıvrılmış boyutların delik sayısının -tam bir zirve fiziği- ulaşılabilir enerjilere, doğrudan deneysel olarak sınanabilir bir taş fırlattığını düşünebilirsiniz. Nihayetinde deneyciler parçacık ailelerin sayısını verebiliyor- aslında çoktan verdiler: 3. Fakat maalesef, bilinen on binlerce Calabi-Yau şeklinin her birindeki delik sayısı çok geniş bir aralıkta dolanıyor. Bazılarının 3 deliği var. Ama bazılarının, 4, 5, 25; hatta bazılarının 480 deliği var. Sorun şu ki, şimdilik kimse sicim kuramının denklemlerine bakarak Calabi-Yau şekillerinden hangisinin başka uzamsal boyutları oluşturduğunu nasıl çıkarabileceğimizi bilmiyor. Sayılamayacak kadar fazla olasılık içinden Calabi-Yau şekillerinden birini seçmemizi mümkün kılacak ilkeyi bulabilirsek, o zaman gerçekten de dağın tepesinden, deneycilerin kampına bir taş yuvarlanmış olacak. Kuramın denklemlerinin işaret ettiği o tek Calabi-Yau şeklinin üç tane deliği olursa eğer, sicim kuramının, dünyanın bildik, ama tümüyle gizemli bir özelliğini açıklayan etkileyici bir söylem sonrasını bulmuş olacağız. Fakat Calabi-Yau şekilleri arasında seçim yaparken dayanak alacağımız ilkenin bulunması, henüz çözülmemiş bir sorun. Yine de -önemli olan da bu zaten- sicim kuramının, parçacık fiziğinin temel muammasını cevaplama potansiyeli ortaya koyduğunu görüyoruz ki, bu da başlı başına ciddi bir ilerlemedir.



Şekil 9.1 Bir simit (torus) ve onun çok delikli kuzenleri.

Parçacık ailesi sayısı, başka boyutların geometrik biçimlerinin deneysel sonuçlarından yalnızca biridir. Başka boyutların, olası sicim titreşimleri üzerindeki etkileri yoluyla görülen diğer sonuçları arasında kuvvet ve madde parçacıklarının ayrıntılı özellikleri de yer alır. Başlıca örneklerden birini belirteyim. Strominger ile Witten sonraları yaptıkları bir çalışmada, her ailedeki parçacıkların kütlelerinin -durun, durun, burası biraz çetrefilli- Calabi-Yau şeklindeki çeşitli deliklerin birbirleriyle kesişme ve örtüşme sınırlarına bağlı olduğunu gösterdi, insanın gözünde canlandırması zor, ama anafikri şu: Sicimler, kıvrılmış diğer boyutlarda titreşiyor, bu titreşme sırasında Calabi-Yau şeklinde bulunan çeşitli deliklerin tam düzenlenme biçimi ve Calabi-Yau şeklinin bu delikleri sarma biçimi olası titreşim örüntüleri üzerinde doğrudan etkili oluyor. Ayrıntıları takip etmek zor ve gerçekten o kadar elzem olmasa da, önemli bir noktayı belirtelim: Parçacık ailesi sayısında olduğu gibi, sicim kuramı bize daha önceki kuramların tümüyle suskun kaldığı soruları - elektronun ve diğer parçacıkların neden sahip oldukları kütleye sahip oldukları gibi soruları- cevaplayacak bir çerçeve sunabilir. Fakatyine, bu hesapları gerçekleştirmek, diğer boyutların geometrik biçimi için hangi Calabi-Yau şeklini temel alacağımızı bilmemizi gerektiriyor.

Önceki tartışmalar, sicim kuramının Tablo 1.1'de gördüğünüz madde parçacıklarının özelliklerini bir gün nasıl açıklayabileceği konusunda bir fikir verebilir. Sicim kuramcıları, benzer bir hikâyenin, bir gün, Tablo 1.2'de gördüğünüz temel kuvvetlerin haberci parçacıklarının özelliklerini de açıklayacağına inanıyor. Yani, geniş ve kıvrılmış boyutlarda gezinen, kıvrılıp titreşen sicimlerin, geniş salınım repertuarlarının küçük bir bölümünü spinleri 1 ya da 2'ye eşit

olan örüntülerin oluşturduğuna. Bu örüntüler, kuvvet-taşıyıcı sicim-titreşim halleri adaylarıdır. Calabi-Yau uzayının şekli ne olursa olsun, kütlesiz olan ve spini 2'ye eşit bir tek titreşim örüntüsü vardır hep; bu örüntüyü graviton olarak tespit etmiş bulunuyoruz. Fakat spini 1'e eşit haberci parçacıkların tam listesi -sayıları, aktardıkları kuvvetin gücü, bağlı oldukları *ayar* simetrileri- kritik bir biçimde kıvrılmış boyutların tam geometrik biçimine dayanmaktadır. Böylece bir kez daha sicim kuramının, evrenimizde gözlenen haberci-parçacık içeriğini açıklayacak, yani temel kuvvetlerin özelliklerini açıklayacak bir çerçeve sunduğunu, fakat başka boyutların hangi Calabi-Yau şekli gibi kıvrıldığını tam olarak bilmeden kesin öngörülerde ya da söylem sonralarında (Witten'ın kütleçekimi söylem sonrasıyla ilgili sözleri dışında) bulunamayacağımızı görüyoruz.

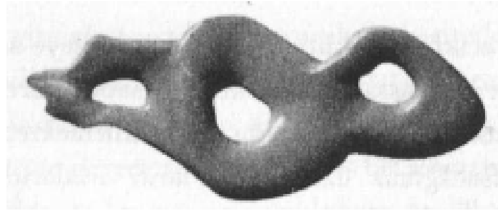
"Doğru" Calabi-Yau şeklinin hangisi olduğunu neden belirleyemiyoruz? Sicim kuramcılarının çoğu bunun kabahatini, halihazırda sicim kuramını analiz etmekte kullanılan kuramsal araçların yetersizliğinde buluyor. XII. Bölüm'de biraz daha ayrıntılı olarak tartışacağım üzere, sicim kuramının matematiksel çerçevesi o kadar karmaşıktır ki, fizikçiler ancak *tedirginlik kuramı* olarak bilinen bir formellik yoluyla yaklaşık hesaplar gerçekleştirebilmektedirler. Bu yaklaşıklık şemasına göre, olası bütün Calabi-Yau şekillerinin her biri diğerleriyle aynı koşullardaymış gibi görünmektedir; denklemler temelde hiçbirini öne çıkarmamaktadır. Sicim kuramının fiziksel sonuçları da, kıvrılmış boyutların tam biçimine duyarlı olduğundan, birçok Calabi-Yau şekli arasından birini seçme yetisi olmaksızın, deneysel olarak sınanabilir belirleyici sonuçlar çıkarılamaz. Bugünkü araştırmaların gerisindeki itici güçlerden biri de, başka yararların yanı sıra, başka boyutlar için tek bir Calabi-Yau şekline bizi ulaştıracağı umuduyla, yaklaşıklık yaklaşımını aşan kuramsal yöntemler geliştirmektir. Bu yöndeki ilerlemeyi XIII. Bölüm'de tartışacağız.

Tükenen Olasılıklar

Bu durumda şu soruyu sorabilirsiniz: Sicim kuramının hangi Calabi-Yau şeklini seçtiğini henüz bilmesek de, seçeneklerden biri, gözlediklerimize uygun düşen fiziksel özelliklere ulaştırıyor mu bizi?

Başka bir deyişle bütün Calabi-Yau şekillerinin her birine denk düşen fiziksel özellikleri inceleyip hepsini devasa bir katalogda toplayacak olsak, gerçekliğe denk düşen bir şekil bulabilir miyiz aralarında? önemli bir sorudur bu, fakat iki önemli sebepten ötürü, aynı zamanda tam anlamıyla cevaplaması zor bir sorudur.

Yalnızca üç aile sonucunu veren Calabi-Yau şekillerine odaklanmak anlamlı bir başlangıç olabilir. Böylece tutarlı seçenekler listesi hatırı sayılır ölçüde kısalır, gerçi liste yine de uzun. Aslına bakarsanız, çok delikli bir simidi, delik sayısını değiştirmeksizin çok çeşitli -sonsuz çeşitlilikte- şekillere sokabileceğimizi fark etmişsinizdir. Şekil 9.2'de, Şekil 9.1'de en altta yer alan şeklin böyle bir deformasyona uğratılmış bir halini görüyorsunuz. Çok benzer bir şekilde, üç delikli bir Calabi-Yau uzayıyla işe başlayıp delik sayısını değiştirmeden yavaş yavaş şeklini değiştirerek devam edebiliriz, böylece yine sonsuz gibi görünen bir şekiller dizisi ortaya çıkar. (Önceden on binlerce Calabi-Yau şekli olduğunu söylerken, bu tür hafif deformasyonlarla birbirlerine dönüşebilecek bütün bu şekilleri bir arada gruplamıştık, bütün bir grubu da tek bir Calabi-Yau uzayı olarak saymıştık.) Sorun, sicim örüntülerinin ayrıntılı fiziksel özelliklerinin, kütlelerinin, kuvvetlere verdikleri tepkilerin, şekilde meydana gelen bu gibi ayrıntılı değişikliklerden çok fazla etkilenmesidir, fakat yine burada da bir olasılık yerine diğerini seçmemizi sağlayacak bir aracımız yok elimizde. Fizik profesörleri kaç yüksek lisans öğrencisini daha bu işe koşarsa koşsun, sonsuz sayıda farklı şekiller listesine tekabül eden fiziği çıkarmak mümkün değildir.



Şekil 9.2 Çok delikli bir simidin şekli, delik sayısını değiştirmeksizin birçok biçimde deforme edilebilir; bunlardan biri de

burada gösteriliyor.

Bunun idrak edilmesi, sicim kuramcılarının, olası bir Calabi-Yau şekillen örnekleminden doğan fiziği incelemesine yol açmıştır. Gelgelelim burada da hayat rahat akmamaktadır. Sicim kuramcılarının halihazırda kullandığı yaklaşık denklemler, belli bir Calabi-Yau şekli seçeneğinden doğan fiziği tam olarak inceleyebileceğimiz kadar güçlü değildir. Bu denklemler, gözlemlediğimiz parçacıklarla uyuşacaklarını umduğumuz sicim örüntülerinin özelliklerini anlamamız konusunda uzun bir yol kat etmemizi sağlayabilirler; topun gireceği yere dair tahmin yürütme hesabı. Fakat elektronun kütlesi veya zayıf kuvvetin gücü gibi somut ve kesin fiziksel sonuçlar, mevcut yaklaşıklık çerçevesinden çok daha kesin denklemleri gerekli kılmaktadır. VI. Bölüm'den -ve Doğru Fiyat örneğinden- hatırlayalım: Sicim kuramının "doğal" enerji ölçeği Planck enerjisidir ve sicim kuramı ancak ve ancak son derece hassas iptaller sayesinde, bilinen madde ve kuvvet parçacıklarının kütlelerine yakın kütleye sahip titreşim örüntüleri verir. Hassas iptaller kesin hesaplar gerektirir, çünkü küçücük hatalar bile doğruluğu çok etkilemektedir. XII. Bölüm'de tartışacağımız üzere, 1990'ların ortalarında fizikçiler mevcut yaklaşık denklemlerin aşılması yolunda ciddi ilerlemeler kaydetmişlerdi, fakat alınacak çok yol var hâlâ.

Peki o halde nerede duruyoruz? Calabi-Yau şekilleri arasından birini seçmemizi sağlayacak temel kriterlerden yoksun olmak, ayrıca böyle bir seçimin gözlenebilir sonuçlarını tam anlamıyla çıkarsayabilmemiz için gerekli kuramsal araçların hepsine sahip olmamak gibi engellerle karşı karşıya olsak dahi, Calabi-Yau şekilleri katalogundan yapacağımız bir seçimin gözlemlerimizle kabaca olsun uyuşan bir dünya ortaya koyup koymayacağını sorabiliriz. Bu sorunun cevabı hayli cesaretlendiricidir. Calabi-Yau katalogundaki kalemlerin çoğu, dünyamızla ciddi farklılıklar gösteren gözlenebilir sonuçlar (başka farklılıkların yanı sıra parçacık ailesi sayılarının farklı olması, temel kuvvetlerin farklı sayıda ve tipte olması gibi) verse de, katalogdaki birkaç kalem, gerçek hayatta gözlemlediğimiz fiziğe niceliksel olarak *yakın* bir fizik ortaya koymaktadır. Başka bir deyişle,

sicim kuramının gerektirdiği kıvrılmış boyutları temsil etmek üzere seçilmeleri halinde, standart modeldeki parçacıklara yakından benzeyen sicim titreşimlerine yol açacak Calabi-Yau örnekleri *vardır.* Asıl önemlisi de sicim kuramı, kütleçekimi kuvvetini bu kuantum mekanik çerçeveye başarılı bir biçimde eklemiştir.

Mevcut anlayış düzeyimiz itibarıyla, bu durum umabileceğimizin en iyisidir. Calabi-Yau şekillerinin birçoğu deneyle kabaca uyuşsaydı, belli bir tercih ile gözlediğimiz fizik arasındaki bağlantıyı kurmak o kadar zorlayıcı olmayabilirdi. Birçok tercih hesaplara uyabilir, böylece deneysel bir bakış açısından bile hiçbirini ayırıp öne çıkarmak mümkün görünmeyebilir. Öte yandan Calabi-Yau şekillerin hiçbiri gözlenen fiziksel özellikleri göstermeye birazcık olsun yaklaşmıyorsa, bu durumda sicim kuramı güzel bir kuramsal çerçeve olsa da, evrenimizle hiçbir ilgisi yokmuş gibi görünecektir. Ayrıntılı fiziksel etkileri belirleme konusundaki hayli işlenmemiş mevcut becerimizle, kabul edilebilirlik kıstaslarına sahip görünen az sayıda Calabi-Yau şekli bulmak son derece cesaretlendirici bir sonuçtur.

Temel madde ve kuvvet parçacıklarının özelliklerini açıklamak, en büyük bilimsel başarılardan biri -belki de en büyüğü- olacaktır. Yine de sicim kuramının ortaya koyduğu, deneysel fizikçilerin şimdi ya da öngörülebilir bir gelecekte doğrulama girişiminde bulunabileceği öngörüler olup olmadığını sorabilirsiniz. Vardır.

Süperparçacıklar

Sicim kuramına dayanarak ayrıntılı tahminler ortaya koymamızı engelleyen kuramsal sıkıntılar, sicimlerden oluşan bir evrenin özel yönlerinden çok, genel yönlerini aramaya zorluyor bizi. Bu bağlamda "genel özellikler"den kastım, sicim kuramı açısından çok temel olan özelliklerdir; bunlar o kadar temel özelliklerdir ki sicim kuramının, bugün kuramsal anlamlandırma becerimizin ötesinde kalan ayrıntılı özelliklerinden tümüyle bağımsız olmasalar da, bunlara duyarsızdırlar. Bu özellikleri, kuramın tamamını iyice anlamadan dahi kendimizden emin olarak tartışabiliriz. Sonraki bölümde başka

örneklere de bakacağız, ama şimdilik bir tek özelliğe odaklanıyoruz: Süpersimetri.

Daha önce de tartıştığımız gibi, sicim kuramının temel bir özelliği, son derece simetrik olması, yalnızca sezgisel simetri ilkelerini kapsamakla kalmayıp bu ilkelerin maksimum matematiksel uzantısına, yani süpersimetriye de uygun olmasıdır. Bu da, VII. Bölüm'de tartıştığımız üzere, sicim titreşimi örüntülerinin, eşlerden birinin spininin diğerinden yarım birim küçük olduğu çiftler -süpereş çiftleri- halinde oluştuğu anlamına gelir. Sicim kuramı doğruysa eğer, bu durumda sicim titreşimlerinden bazıları bilinen temel parçacıklara tekabül edecektir. Süpersimetrik eşleşmeden dolayı da, sicim kuramı bilinen her parçacığın bir süpereşe sahip olduğu *öngörüsünde* bulunur. Bu süpereş parçacıkların her birinin taşıması gereken kuvvet yüklerini belirleyebiliriz, fakat halihazırda, bu parçacıkların kütlelerini tahmin etme becerisine sahip değiliz. Fakat hâl böyleyken dahi, süpereşlerin var olduğu *öngörüsü,* sicim kuramının genel bir özelliğidir; sicim kuramının henüz çıkartamadığımız özelliklerinden bağımsız olarak geçerlilik taşıyan, gerçek bir özelliğidir.

Bilinen temel parçacıklardan hiçbirinin süpereşleri şimdiye dek gözlenmemiştir. Bu durum, bu parçacıkların var olmadığı, sicim kuramının yanlış olduğu anlamına gelebilir. Fakat birçok parçacık fizikçisine göre bu, süpereşlerin çok ağır olduğunu, dolayısıyla mevcut deneysel gözlem kapasitemizi aştığını göstermektedir. Fizikçiler bugünlerde İsviçre'nin Cenevre kentinde devasa bir hızlandırıcı inşa ediyorlar: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı. Bu makinenin süpereş parçacıkları bulacak kadar güçlü bir makine olmasına büyük umutlar bağlanmıştır. Hızlandırıcının, 2010 tarihinden önce çalışmaya hazır olması gerekmektedir, bundan kısa bir süre sonra da süpersimetri deneysel olarak doğrulanabilir. Schwarz'ın dediği gibi, "Süpersimetrinin çok geç kalmadan keşfedilmesi gerekiyor. Bu gerçekleştiğinde, çok büyük bir şey olacak.

Fakat aklınızda tutmanız gereken iki şey var. Süpereş parçacıklar bulunsalar bile, tek başına bu olgu, sicim kuramının doğru olduğunu

göstermeye yetmeyecektir. Daha önce görmüş olduğumuz gibi, süpersimetri, sicim kuramı üzerinde çalışılırken keşfedilmiş olsa da, nokta parçacıklara dayalı kuramlara da gayet başarılı bir biçimde dahil edilmiştir, dolayısıyla sicim kuramına özgü değildir. Öte yandan, süpereş parçacıkların Büyük Hadron Çarpıştırıcısı tarafından bulunamaması halinde, bu olgu da tek başına sicim kuramını geçersiz kılmayacaktır, çünkü süpereşlerin bu makinenin inceleme eriminin ötesine geçecek kadar ağır olması da söz konusu olabilir.

Bunları söylemişken şunu da ekleyeyim: Aslında süpereş parçacıkların bulunması, sicim kuramının güçlü ve heyecan verici ikinci derece kanıtlarından biri olacaktır kesinlikle.

Kesirli Yüklere Sahip Parçacıklar

Sicim kuramının, başka bir deneysel imzası da elektrik yüküyle ilgilidir; süpereş parçacıklar kadar genel olmayan, fakat ayrn ölçüde önemli bir özelliktir bu. Standart modeldeki temel parçacıklar, elektrik yükleri bakımından çok sınırlı bir çeşitlilik gösterirler: Kuarklar ve karşı kuarklar 1/3 ya da 2/3 ve bunların negatif değerlerinde elektrik yüküne sahiptir, diğer parçacıklarınsa elektrik yükü 0, 1 ya da —1'dir. Evrende bilinen tüm madde, bu parçacıkların kombinasyonlarıyla açıklanır. Fakat sicim kuramında, ciddi biçimde farklı elektrik yüklerine sahip parçacıklara denk gelen titreşim örüntülerinin bulunması mümkündür. Örneğin, bir parçacığın elektrik yükü çok çeşitli başka olasılıkların yanı sıra 1/5, 1/11, 1/13 ya da 1/53 gibi acayip kesirli değerler alabilir. Kıvrılmış boyutlar belli bir geometrik özelliğe sahipse eğer böyle sı radı şı yükler ortaya çıkabilir. Bu geometrik özelliği şöyle özetleyebiliriz: Sicimler tarafından sarmalanmak gibi tuhafbir özelliğe sahip delikler, bu sarmalanmadan ancak ve ancak belli kereler kendi etraflarında sarmalanmakla kurtulur." Ayrıntıların özel bir önemi yoktur, fakat öyle görünüyor ki, sarmalanmadan kurtulmak için gerekli sarmalanmaların sayısı, mümkün olan titreşim örüntülerinde kendini göstermekte, titreşim örüntüleri kesirli yüklerdeki paydayı belirlemektedir.

Bazı Calabi-Yau şekilleri bu özelliğe sahiptir, diğerleriyse değildir, bu yüzden de sıradışı kesirli elektrik yüküne sahip olma olasılığı süpereş parçacıkların varlığı kadar genel bir özellik değildir. Öte yandan, süpereşlerin varlığına ilişkin öngörü, sicim kuramının benzersiz bir özelliği olmasa da, yılların deneyimi göstermiştir ki, bir nokta parçacık kuramında bu tür acayip kesirli elektrik yüklerinin var olması için ikna edici bir sebep yoktur. Bu yükler zorla bir nokta parçacık kuramına dahil edilebilir, fakat bunu yapmak züccaciye dükkânına fil sokmak ne kadar doğalsa o kadar doğal olacaktır. Başka boyutların sahip oldukları basit geometrik özelliklerden dolayı ortaya çıkmaları olasılığı, bu sı radı şı elektrik yüklerini sicim kuramının doğal bir deneysel imzası kılıyor olabilir.

Süperparçacıklarda olduğu gibi, böyle acayip yüklere sahip parçacıklar da hiç gözlenmemiştir; sicim kuramı anlayışımız da, başka boyutlar büyükleri ortaya çıkaracak özelliklere sahip olsaydı bu parçacıkların kütleleri ne olurdu sorusuna karşılık kesin bir öngörüyü mümkün kılmamaktadır. Bu parçacıkları görmememizin bir açıklaması yine, var olsalardı eğer kütlelerinin bugünkü teknolojik imkânlarımızı aşan boyutlarda olması gerektiği cevabı olabilir; aslında bu parçacıkların kütlelerinin Planck kütlesi düzeninde olması muhtemeldir. Fakat gelecekte yapılacak bir deneyde, böyle acayip elektrik yükleriyle karşılaşılması, sicim kuramı lehinde çok güçlü bir kanıt oluşturacaktır.

Bazı Uzun Dönem Olasılıklar

Sicim kuramı lehinde kanıtlar bulabilmenin başka yolları da vardır. Örneğin, Witten uzun dönemli bazı olasılıklar bulunması olasılığına dikkat çekmiş, gökbilimcilerin bir gün gökyüzünü gözlerken topladıkları veriler içinde sicim kuramının doğrudan bir imzasını görebileceğini söylemiştir. VI. Bölüm'de gördüğümüz üzere, bir sicimin boyutu, genelde Planck uzunluğundadır, fakat daha enerjik sicimler daha büyük boyutlara ulaşabilir. Aslına bakarsanız, Büyük Patlama'nın enerjisi, makroskobik boyutlarda birkaç sicim ortaya çıkaracak kadar büyük olmalıdır, bu sicimler kozmik genişleme sonucu astronomik ölçeklerde büyümüş olabilir. Bugün ya da

gelecekte bir gün, bu tür bir sicimin bir gece gökyüzünden geçebileceğini, böylece gökbilimcilerin topladıkları veriler üzerinde yanılmaz ve ölçülebilir bir iz (arka plandaki kozmik mikrodalga sıcaklığında küçük bir değişiklik gibi; IVX. Bölüm'e bakınız) bırakabileceğini hayal edebiliriz. Witten'ın dediği gibi, "Biraz hayalperestçe de olsa, sicim kuramının doğrulanması yolunda en sevdiğim senaryo bu, hiçbir şey bu meseleyi teleskopta bir sicim görmenin yaratabileceği kadar ciddi bir etki yaratarak sonuçlandıramaz.

Yeryüzünün yakınlarında da, sicim kurammın deneysel imzaları olabileceği ileri sürülen başka kanıtlar vardır. Beş tane örnek var. Öncelikle, Tablo 1.1'den bahsederken nötrinolar çok mu hafif yoksa hiç mi kütleleri yok bilmediğimizi söylemiştik. Standart modele göre nötrinoların kütlesi yoktur, fakat bunun özellikle derinlerde yatan bir sebebi de yoktur. Sicim kuramına getirilebilecek bir itiraz, bugün ve ilerde nötrinolar hakkındaki verilerle ilgili olarak ikna edici bir açıklama getirilmesi, özellikle de nihayetinde deneyler sonucu nötrinoların küçük fakat sıfıra eşit olmayan bir kütleye sahip olduğunun gösterilmesi olacaktır. İkincisi, standart modelin ortadan kaldırdığı, fakat sicim kuramının, mümkün kıldığı bazı varsayımsal süreçler vardır. Protonun çözülmesi olasılığı (kaygılanmayın, doğruysa eğer bu çözülme çok yavaş gerçekleşecektir) ve çeşitli kuark bileşimlerinin nokta parçacıklara dayalı kuantum alan kuramının uzun zamandır yerleşik kabul ettiği özellikleri çiğneyerek mutasyon geçirip bozunması olasılıkları bu süreçler arasında yer alır. Bu tür süreçler özellikle ilginçtir, çünkü geleneksel kuramda yer almamaları, onları yeni kuramsal ilkelere başvurmaksızın açıklanamayacak hassas fiziksel emareler haline getirir. Gözlem yapılırsa eğer, bu süreçlerin biri, sicim kuramının bir açıklama getirmesi için verimli bir zemin oluşturacaktır. Üçüncüsü, bazı Calabi-Yau seçenekleri dikkate alındığında, yeni, küçük, uzun erimli kuvvet alanlarının varlığını etkili bir biçimde gündeme getirebilecek belli sicim titreşim örüntüleri söz konusudur. Bu tür yeni kuvvetlerin etkilerinin keşfedilmesi de, pekâlâ sicim kuramının yeni fiziğini kısmen yansıtabilir. Dördüncüsü, sonraki bölümde belirttiğimiz üzere, gökbilimciler galaksimizin, muhtemelen de bütün evrenin *karanlık*

maddeye gömülmüş olduğu yönünde kanıtlar toplamışlardır, karanlık maddenin özellikleri henüz belirlenmemiştir. Sicim kuramı, birçok olası titreşim örüntüsü sayesinde, karanlık madde için birçok aday önermektedir; bu adaylar hakkındaki karar, karanlık maddenin ayrıntılı özelliklerini ortaya koyan gelecekteki deneylerin sonuçlarını beklemektedir.

Son olarak, sicim kuramını gözlemlere bağlamanın beşinci olası yolu, kozmolojik sabitle ilgilidir; III. Bölüm'de tartıştığımız üzere, kozmolojik sabitin, Einstein'ın evrenin statik olduğu sonucuna varmak için ilk genel görelilik denklemlerinde geçici olarak yaptığı değişiklik olduğunu hatırlayalım. Sonradan evrenin genişliyor olduğunun keşfedilmesi, Einstein'ı bu değişiklikten vazgeçmeye zorlamışsa da, o tarihten beri, fizikçiler kozmolojik sabitin neden sıfır olması gerektiğinin bir açıklaması olmadığını fark etmişlerdir. Aslına bakarsanız kozmolojik sabit, uzay boşluğunda depolanmış bir tür toplam enerji olarak yorumlanabilir, dolayısıyla da değeri kuramsal olarak hesaplanabilir, deneysel olarak da ölçülebilir olmalıdır. Fakat bugüne dek, bu tür hesaplar ve ölçümler devasa bir uyumsuzluğu ortaya koymuştur: Gözlemler, kozmolojik sabitin ya sıfır olduğunu (Einstein'ın nihayetinde ileri sürdüğü gibi) ya da hayli küçük olduğunu göstermektedir; hesaplar, boş uzaydaki kuantum mekanik dalgalanmaların, değeri sıfır olmayan, deneylerin mümkün kıldığından on üzeri 120 (1'den sonra 120 sıfır geliyor) daha büyük (!) bir değere sahip bir kozmolojik sabit yaratma eğiliminde olduğunu göstermiştir. Bu durum sicim kuramcılarının önüne muhteşem bir zorluk ve fırsat koyuyor: Sicim kuramının hesapları, bu uyumsuzluk üzerinden ilerleyip kozmolojik sabitin neden sıfır olduğunu açıklayabilir mi ya da deneyler nihayetinde kozmolojik sabitin değerinin küçük olduğunu, ama sıfır olmadığını ortaya koyarsa sicim kuramı bunun bir açıklamasını sunabilir mi? Sicim kuramcıları bu güçlüğü aşabilselerdi eğer -şimdilik bu durumda değillerdir- kuramı destekleyen ikna edici bir kanıt ortaya koymuş olurlardı.

Bir Değerlendirme

Fizik tarihi, ilk ortaya konduklarında tümüyle sınanamaz görünen, fakat öngörülemeyen çeşitli gelişmeler sonucu, nihayetinde deneysel olarak doğrulanabilmenin alanına giren fikirlerle doludur. Maddenin atomlardan oluştuğu yönündeki kavrayış, Pauli'nin hayaletsi nötrino parçacıkların varlığına dair varsayımı, göklerin nötron yıldızları ve kara deliklerle dolu olduğu görüşü, tam da bu tür üç önemli fikirdir; bugün sıkıca sarıldığımız, fakat ilk ortaya atıldıklarında bilimsel gerçeklerin özelliklerinden çok bilim kurgu hayaller olarak görülmüş fikirlerdir bunlar.

Sicim kuramının ortaya konulmasının arkasındaki itici güçler de, en az bu üç fikirde olduğu kadar ikna edici olmuştur; aslına bakarsanız sicim kuramı kuramsal fizikte, kuantum mekaniğinin keşfinden buyana gelmiş geçmiş en önemli ve heyecan verici gelişme addedilmiştir. Bu kıyaslama gayetyerinde bir kıyaslamadır, çünkü kuantum mekaniğinin tarihi bize, fizik alanındaki devrimlerin olgunluğa ermesinin yıllar alabileceğini göstermektedir. Bugünün sicim kuramcılarıyla karşılaştırıldığında, kuantum mekanikçileri büyük bir avantaja da sahiplerdi: Kuantum mekaniği kısmen formüle edilmiş olsa da, deneysel sonuçlarla doğrudan bir ilişkisi vardı. Hal böyleyken kuantum mekaniğinin mantıksal yapısının oturtulması 30 yıla yakın bir zaman aldı, özel göreliliğin tam anlamıyla kurama dahil edilmesi de bir 20 yılı buldu. Bugünse genel göreliliği kurama dahil ediyoruz; çok daha zor bir iş bu, üstelik deneylerle doğrudan bağlantılı olmayı daha da zorlaştıran bir iş. Kuantum kuramı üzerine çalışanların tersine, bugünkü sicim kuramcıları, doğanın, bir sonraki adımlarında onlara kılavuzluk edecek olan -ayrıntılı deneysel sonuçlar yoluyla- aydınlatıcı ışığına sahip değiller.

Bu da, bir ya da birden fazla fizikçi kuşağının hayatlarını bir nebze olsun deneysel geri bildirim almaksızın sicim kuramının araştırılmasına ve geliştirilmesine adayacağının düşünülebilir olması anlamına geliyor. Dünya çapında, sicim kuramını kuvvetle takip etmekte olan ciddi sayıda fizikçi bir risk aldıklarını biliyor: Ömür boyu süren çabaları, kesin bir sonuç vermeyebilir. Hiç kuşku yok ki kuramsal alanda ciddi ilerlemeler sürecektir, fakat mevcut engellerin aşılması ve deneysel olarak sınanabilir, kesin öngörüler ortaya

konması için bu yeterli olacak mıdır? Dolaylı testler, sonuçta sicim kuramının üzerinden duman tüten tabancası olabilecek midir? Bu sorular bütün sicim kuramcıları açısından temel bir önem taşır, bunlar aynı zamanda gerçekten haklarında hiçbir şey söylenemeyecek sorulardır. Ancak ve ancak zaman, cevapları ortaya çıkaracaktır. Sicim kuramının güzel sadeliği, kütleçekimi ile kuantum mekaniği arasındaki çatışmayı yatıştırma biçimi, doğanın bütün bileşenlerini birleştirme yetisi, sınırsız öngörüde bulunma potansiyeli, bunların hepsi de bu riski üstlenmeye değer kılan zengin ilham kaynakları sunar.

Bu kibirli değerlendirmeler, sicim kuramının, sicimlere dayalı bir evrenin dikkat çekici yeni fiziksel özelliklerini -doğanın işleyişinde ince ve derin bir tutarlılık bulunduğunu gösteren özellikler- ortaya çıkarma becerisiyle sürekli güçlendirilmektedir. Yukarıda kullandığımız dil itibarıyla, bunların birçoğu, bugün bilinmeyen ayrıntılardan bağımsız olarak sicimlerden oluşan bir evrenin temel özellikleri olacaklar. Bunlar arasında en şaşırtıcı olanlar, hep gelişmekte olan uzay ve zaman kavrayışımız üzerinde derin bir etki yaratmıştır.

X. Bölüm

Kuantum Geometrisi

Einstein yaklaşık on yıllık bir zaman dilimi içinde, asırlık Newtoncu çerçeveyi tek başına bir kenara itmiş ve dünyaya yepyeni, kanıtlanabilecek kadar derin bir kütleçekimi kavrayışı sunmuştu. Çok geçmeden konunun uzmanı olanlar kadar olmayanlar da, Einstein'ın genel görelilik kuramını kurmaktaki başarısının göz kamaştırıcı parlaklığını ve anıtsal özgünlüğünü göklere çıkaracaktı. Ama Einstein'ın bu başarısına ciddi bir katkıda bulunan elverişli birtakım tarihsel koşulları göz ardı etmememiz gerekir. Bahsettiğimiz bu elverişli koşulların en başında da Georg Bernhard Riemann'ın 19. yüzyılda geliştirdiği, rasgele boyutlardaki eğri uzamları betimlemek için gerekli geometrik araçları sunan matematiksel görüşleri gelir. Riemann 1854'te Göttingen Üniversitesi nin açılışında yaptığı o meşhur konuşmada, düz uzamlara dayalı Eukleidesçi düşüncenin zincirlerini kırmış ve her türden eğri yüzey geometrisinin matematiksel açıdan serbest bir yaklaşımla benimsenmesinin yolunu açmıştı. Matematiğin Şekil 3.4'te ve 3.6'da görülenlere benzer yamulmuş uzamları niceliksel olarak inceleyebilmesini sağlayan Riemann'ın görüşleridir. Einstein'ın dehası bu matematiğin, kütleçekimi kuvvetiyle ilgili yeni görüşünün uygulanması açısından biçilmiş kaftan olduğunu görmesinde yatar. Einstein, Riemann geometrisindeki matematiğin kütleçekimi fiziğiyle mükemmel bir uyum içinde olduğunu cesurca dile getirmiştir.

Fakat bugün, Einstein'ın müthiş başarısından neredeyse bir asır sonra sicim kuramı bize genel göreliliği (mesafeler Planck uzunluğu kadar kısa olduğunda) kaçınılmaz olarak değiştiren, kütleçekiminin kuantum mekaniksel bir betimlemesini sunuyor. Riemann geometrisi genel göreliliğin matematiksel açıdan en önemli kısmı olduğundan, sicim kuramının yeni kısa mesafe fiziğini aynen yansıtabilmesi için Riemann geometrisinin de değiştirilmesi gerekir. Genel görelilik kuramı, evrenin eğri özelliklerinin Riemann geometrisiyle tanımlandığını ileri sürerken, sicim kuramı bunun sadece evrenin dokusunu yeterince büyük ölçeklerde incelediğimizde geçerli

olduğunu ileri sürer. Planck uzunluğu kadar küçük ölçeklerde, sicim kuramının yeni fiziğiyle uyumlu, yeni bir geometri türünün ortaya çıkması gerekir. Bu yeni geometrik çerçeveye *kuantum geometrisi* denir.

Riemann geometrisi için olduğunun aksine, sicim kuramcılarının benimseyip kuantum geometrisinin hizmetine sunabileceği, bir matematikçinin rafında hazır bekleyen bir geometri şaheseri yoktur. Fizikçiler ve matematikçiler bugün azimle sicim kuramını inceliyor ve yavaş yavaş fiziğin ve matematiğin yeni bir dalını oluşturuyor. Elikâyenin tamamı henüz yazılmamışsa da bu araştırmalar, sicim kuramının uzay-zamana dair öngördüğü yeni geometrik özelliklerin birçoğunu -Einstein'ı bile mutlaka heyecanlandırırdı diyebileceğimiz özellikler- ortaya çıkarmıştır.

Riemann Geometrisinin Özü

Bir trambolinin üzerinde zıplarsanız, vücudunuzun ağırlığı, trambolinin elastik liflerinin gerilerek trambolinin yamulmasına yol açar. Vücudunuzun altına gelen kısımda bu gerilme en yüksek düzeydedir, trambolinin kenarlarına doğru daha az fark edilir bir hal alır. Trambolinin üzerinde Mona Lisa gibi tanıdık bir resim olması halinde bunu açıkça görebilirsiniz. Trambolinin üzerinde herhangi bir ağırlık yoksa Mona Lisa normal görünür. Ama trambolinin üzerinde durduğunuzda, Mona Lisanın görüntüsü, özellikle de Şekil 10.1'de görüldüğü üzere tam vücudunuzun altına gelen kısımda çarpılır.

Bu örnek, Riemann'ın yamulmuş şekilleri betimlemek için geliştirdiği matematiksel çerçevenin özünü anlatıyor. Kendinden önce gelen Cari Friedrich Gauss, Nikolai Lobachevsky, Janos Bolyai ve başka matematikçilerin görüşlerinden yararlanan Riemann, bir nesnenin üzerindeki ya da içindeki bütün yerler arasındaki *mesafeleri* titizlikle analiz ederek bir nesnenin eğriliğinin derecesinin hesaplanabileceğini göstermişti. Kabaca dile getirecek olursak, birörnek olmayan gerilme ne kadar fazlaysa -yani düz bir şekil üzerindeki mesafe ilişkilerindeki sapma ne kadar fazlaysa- nesnenin eğriliği de o kadar fazladır. Örneğin trambolinin en fazla gerildiği yer

vücudunuzun tam altında kalan kısmıdır, dolayısıyla en fazla bu bölgedeki noktalar arasındaki mesafe ilişkileri çarpılmıştır. Dolayısıyla trambolinin eğriliği bu bölgede en fazladır; zaten siz de öyle olmasını beklersiniz, çünkü Mona Lisa en fazla bu kısımda çarpılmıştır, o her zamanki gizemli tebessümün yerini asık bir surat almış gibidir.



Şekil 10.1 Mona Lisa trambolini üzerinde dururken, görüntü en çok vücudunuzun ağırlığı altındaki kısımda çarpılır.

Einstein, Riemann'ın matematiksel keşiflerini onlara somut bir fiziksel yorum kazandırarak benimsedi. III. Bölüm'de de tartıştığımız üzere, uzay-zamanın eğriliğinin kütleçekimi kuvvetini içerdiğini gösterdi. Ama gelin bu yorum üzerinde biraz daha düşünelim. Matematiksel olarak uzay-zamanın eğriliği -trambolinin eğriliği gibi-uzay-zamandaki *noktalar* arasındaki mesafe ilişkilerinin çarpıldığını gösterir. Fiziksel olarak, bir nesnenin algıladığı kütleçekimi kuvveti, bu çarpılmanın doğrudan bir yansımasıdır. Aslına bakarsanız nesne giderek küçültüldüğünde, yani noktayı fiziksel açıdan soyut bir matematiksel kavram olarak anlamaya yaklaştıkça, fizik ile matematik hiç olmadığı kadar uyumlu olur. Fakat sicim kuramı, Riemann'ın geometrik biçimciliğinin kütleçekimi fiziği tarafından somut olarak algılanmasına bir sınır getirir, çünkü bir nesneyi küçültmenin bir sınırı vardır. Sicimler düzeyine inildi mi, daha ileri gidilemez. Geleneksel nokta parçacık kavrayışı sicim kuramında yoktur; bu da sicim kuramının kütleçekimine dair bir kuantum kuramı sunabilmesinin temel bir unsurudur. Bu bize, Riemann'ın esas olarak

noktalar arasındaki mesafelere dayanan geometrik çerçevesinin, sicim kuramı tarafından mikro ölçeklerde değiştirildiğini somut bir biçimde gösteriyor.

Bu gözlemin, genel göreliliğin sıradan makroskobik uygulamaları üzerinde çok küçük bir etkisi vardır. Örneğin kozmolojik incelemeler yapan fizikçiler, koskoca galaksileri sanki birer noktaymış gibi modeller; çünkü galaksiler evrenin bütününe kıyasla son derece küçüktür. Bu yüzden de, genel göreliliğin kozmolojik bağlamdaki başarısının da işaret ettiği üzere, Riemann'ın geometrik çerçevesinin böyle ham bir biçimde uygulanması çok kesin bir tahmindir. Fakat ultramikroskobik alanlar söz konusu olduğunda, sicimlerin bir boyutunun olması, basitçe Riemann geometrisinin uygun matematiksel biçim olmamasına yol açar. Birazdan göreceğimiz gibi Riemann geometrisinin yerini, tamamen yeni ve beklenmedik özellikler ortaya çıkmasına yol açan, sicim kuramına özgü kuantum geometrisi almalıdır.

Kozmolojik Bir Oyun Bahçesi

Kozmolojideki Büyük Patlama modeline göre, bütün evren yaklaşık 15 milyar yıl önce, şiddetli bir tekil kozmik patlama sonucu doğmuştur. İlk olarak Hubble'ın keşfettiği üzere, bugün bu patlamanın "kalıntılarının" milyarlarca galaksi olarak hâlâ dışa doğru akmakta olduğunu görebiliyoruz. Evren genişlemektedir. Bu kozmik büyüme sonsuza kadar devam mı edecek, yoksa günün birinde genişleme durup tersine dönecek ve içe doğru bir kozmik patlama mı olacak bilmiyoruz. Gökbilimciler ve astrofizikçiler deneyler yaparak bu soruyu cevaplamaya çalışıyor, çünkü cevap ilkesel olarak ölçülebilen bir şeye bağlı: Evrendeki maddenin ortalama yoğunluğuna.

Eğer maddenin ortalama yoğunluğu *kritik yoğunluğu* aşacak olursa (yani bir santimetreküpte, bir gramın bir milyarda birinin bir milyarda birinin bir milyarda birinin yüzde biri (10^{-29}), ki bu evrenin her metreküpünde yaklaşık beş hidrojen atomu demektir), büyük bir kütleçekimi kuvveti kozmosa nüfuz edecek, genişleme duracak ve

süreç tersine dönecektir. Maddenin ortalama yoğunluğu kritik değerden daha azsa, kütleçekimi genişlemeyi durduramayacak kadar zayıf olacak, bu durumda genişleme sonsuza dek sürecektir. (Dünyaya dair kendi gözlemlerinize dayanarak, evrenin ortalama kütle yoğunluğunun kritik değeri çok aştığını düşünebilirsiniz. Fakat unutmayın ki madde -tıpkı para gibi- kümelenme eğilimindedir. Dünya'nın, Güneş sisteminin, hatta Samanyolu galaksisinin ortalama kütle yoğunluğunu evrenin ortalama kütle yoğunluğunun bir göstergesi olarak kullanmanın, Bill Gates'in servetini ortalama bir dünyalının gelirinin göstergesi olarak kullanmaktan pek bir farkı yoktur. Nasıl ki birçok kişinin serveti Bill Gates'in servetinin yanında hayli sönük kalıyor ve bu da ortalamayı çok düşürüyorsa, galaksilerin arasında da toplam ortalama madde yoğunluğunun ciddi biçimde düşmesine sebep olan neredeyse boş, çok fazla alan vardır.)

Gökbilimciler, galaksilerin uzaydaki dağılımını titizlikle inceleyip evrendeki görünür maddenin ortalama miktarının ne olduğu sorusunu cevaplayabilir. Bu miktarın kritik değerden ciddi oranda az olduğu anlaşılmıştır. Fakat evrenin karanlık maddeyle dolu olduğu yönünde hem kuramsal hem deneysel pek çok güçlü kanıt vardır. Karanlık madde, yıldızlara enerjilerini veren nükleer füzyon süreçlerine dahil olmayan maddedir, dolayısıyla ışık vermez ve teleskopla bakınca görülmez. Kesin miktarını bilmek şöyle dursun, daha kimse karanlık maddenin ne olduğunu çözememiştir. Bu yüzden de halihazırda genişlemekte olan evrenimizin akıbeti şimdilik belirsizdir.

Sırf tartışmayı ilerletmek için, kütle yoğunluğunun kritik değeri aştığını, uzak gelecekte bir gün genişlemenin duracağını ve evrenin kendi üzerine çökmeye başlayacağını varsayalım. Bütün galaksiler yavaş yavaş birbirlerine yaklaşmaya başlayacak, zaman içinde birbirlerine yaklaşma hızları artacak, sonra da çok büyük bir hızla birbirlerine doğru ilerleyeceklerdir. Bütün evreni, giderek sıkışıp küçülen bir kozmik kütle olarak hayal etmeniz gerekiyor. III. Bölüm'de anlatıldığı gibi, evrenin büyüklüğü maksimum milyarlarca ışık yılından milyonlarca ışık yılına inecek, hızları her an artarak birbirine yaklaşan *her şey* tek bir galaksi büyüklüğüne sıkışacak, sonra tek bir

yıldız, ardından bir gezegen, bir portakal, bir fasulye, bir kum tanesi büyüklüğüne, sonra da genel göreliliğe göre bir molekül, bir atom büyüklüğüne inecektir, sonra da önlenemez nihai kozmik çöküşle *hiç büyüklüğü* kalmayacaktır. Genel kabul gören kurama göre, evren başlangıçta sıfır büyüklükten bir patlamayla doğmuştur; yeterince kütlesi varsa, nihai kozmik sıkışmaya benzer bir çöküşle son bulacaktır.

Fakat söz konusu mesafe ölçekleri Planck uzunluğu civarındaysa ya da ondan daha kısaysa, kuantum mekaniğinin genel görelilik denklemlerini geçersiz kıldığını artık gayet iyi biliyoruz. O zaman sicim kuramını kullanmamız gerekir. Böylece, Einstein'ın genel görelilik kuramı evrenin geometrik biçiminin rasgele küçülmesini mümkün kılarken -tıpkı Riemann geometrisindeki matematiğin, soyut bir şeklin aklın alabileceği kadar küçülmesini mümkün kılması gibi- sicim kuramının bu tabloyu nasıl değiştirdiği sorusuyla karşı karşıya kalıyoruz. Birazdan göreceğimiz gibi, sicim kuramının fiziksel olarak erişilebilir mesafe ölçeklerine bir kez daha bir alt sınır getirdiği yönünde kanıtlar vardır. Sicim kuramı evrenin hiçbir uzamsal boyutunun Planck uzunluğundan daha fazla kısaltılamayacağı iddiasında bulunur, ki bu çok dikkat çekici bir yeniliktir.

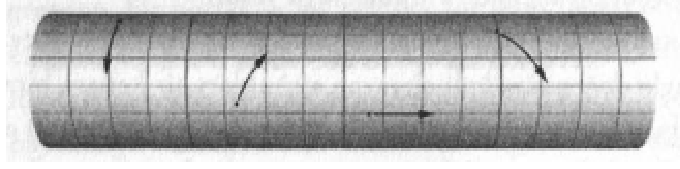
Artık sicim kuramına aşina olduğunuza göre, bunun nasıl olduğuna dair bir tahminde bulunmayı göze alabilirsiniz. Ne de olsa, ne kadar çok noktayı -yani nokta parçacığı- üst üste koysanız da, toplam hacimlerinin hâlâ sıfır olduğunu söyleyebilirsiniz. Oysa bu parçacıklar aslında sicimse, tümüyle rasgele konumlarda bir araya gelmişlerse, sıfırdan farklı büyüklükte bir kabarcığı doldururlar, sanki birbirine dolaşmış lastik bantlardan oluşan Planck büyüklüğünde bir top gibi. Savınız buysa, doğru yoldasınız demektir; fakat sicim kuramının evrenin minimum bir büyüklüğü olacağını iddia ederken zarafetle kullandığı çok önemli ve hemen fark edilmeyen unsurları gözden kaçırıyorsunuzdur. Bu unsurlar etkisini yeni göstermeye başlayan sicim fiziğini ve onun uzay-zamanın geometrisi üzerindeki etkisini somut bir biçimde vurgulamaya yarar.

Konunun bu önemli yönlerini açıklayabilmek için öncelikle, konuyla doğrudan ilgili olmayan ayrıntıları bir kenara bırakan, ama bu arada da yeni fiziği feda etmeyen bir örneğe geri dönelim. Sicim kuramındaki on uzay-zaman boyutunun hepsini -hatta aşina olduğumuz dört uzay-zaman boyutunu bile- dikkate almak yerine, Bahçe Hortumu evrene geri dönelim. Bu iki uzamsal boyutlu evreni ilk olarak VIII. Bölüm'de sicim kuramı öncesi bağlamda, Kaluza ile Klein'ın 1920'lerdeki görüşlerinin çeşitli yönlerini açıklarken kullanmıştık. Şimdi de sicim kuramının özelliklerini basit bir ortamda incelemek için bir "kozmolojik oyun bahçesi" olarak kullanalım: Edindiğimiz kavrayışları, sicim kuramının gerektirdiği bütün uzamsal boyutları daha iyi anlamak için birazdan kullanacağız. Bunun için de, Bahçe Hortumu evrenin dairesel boyutunun başlangıçta gayet dolgun olduğunu, ama sonra boyutlarının giderek küçüldüğünü ve Çizgiülke biçimine -yani büyük çökmenin basitleştirilmiş, kısmi bir haline- yaklaştığını düşünelim.

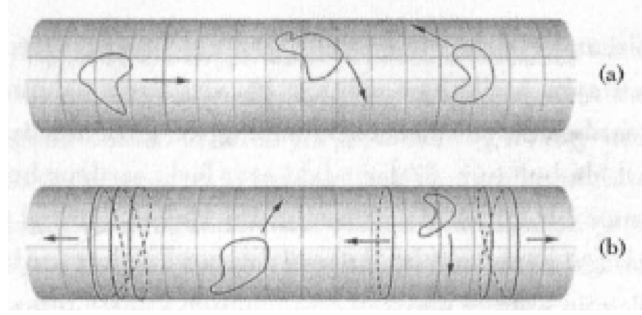
Cevaplamaya çalıştığımız soru şu: Acaba bu kozmik çöküşün geometrik ve fiziksel niteliklerinin, sicimlere dayalı bir evrenden ve nokta parçacıklara dayalı bir evrenden belirgin olarak farklı özellikleri var mı?

En Temel Yeni Özellik

Yeni sicim fiziğinin temelini bulabilmek için çok da uzağa gitmemize gerek yok. Bu ikiboyutlu evrende hareket eden bir nokta parçacık. Şekil 10.2'de görülen biçimlerde hareket edebilir: Bahçe Hortumu evrenin uzunluğu boyunca hareket edebilir, hortumun kıvrılmış kısmı boyunca hareket edebilir ya da bu ikisinin bileşimi olan bir hareket yapabilir. Bir sicim ilmeği de benzeri hareketler yapabilir, ama bir farkla: Sicim ilmeği yüzeyin üzerinde hareket ederken Şekil 10.3 (a)'da görüldüğü gibi salınır. Bu önceden biraz ayrıntılı olarak tartıştığımız bir farklılıktır: Yaptığı salınımlar sicime, kütle ve kuvvet yükü gibi bazı özellikler kazandırır. Sicim kuramının önemli bir yönü olsa da şimdi buna odaklanmayacağız, çünkü bunun fiziksel etkilerini daha önceden anlamıştık.



Şekil 10.2 Bir silindir üzerinde hareket eden nokta parçacıklar



Şekil 10.3 Sicimler bir silindir üzerinde iki farklı biçimde hareket edebilir; "sarılmamış" ve "sarılmış" halde.

Şimdi nokta parçacıkların hareketiyle sicimlerin hareketi arasındaki başka bir farkla ilgileniyoruz; sicimin hareket ettiği uzayın *şekline* doğrudan bağlı bir farkla. Sicimin bir boyutu olduğundan, önceden belirttiklerimizin dışında başka bir olası hareket şekli daha söz konusudur: Şekil 10.3 (b)'de görüldüğü gibi sicim Bahçe Hortumu evrenin dairesel kısmına *satılabilir* (deyim yerindeyse bir kement gibi). Sicim kaymaya ve salınmaya devam edecektir, fakat bunu yer kaplayarak yapacaktır. Aslına bakarsanız, sicim uzayın dairesel kısmını pek çok defa sarabilir (Şekil 10.3 (b)'de gösterildiği gibi); kayarken yine salınındı bir hareket gerçekleştirecektir. Bir sicim böyle sarılmış bir şekildeyse eğer, *sarmal halde* olduğunu söyleriz. Belli ki sarmal hal, sicimlere içkin bir olasılıktır. Nokta parçacıklarda bunun karşılığı yoktur. Şimdi, bu niteliksel olarak yeni sicim hareketinin, hem sicimin kendisi hem de sardığı boyutun geometrik özellikleri üzerindeki etkisini anlamaya çalışalım.

Sarılmış Haldeki Sicimlerin Fiziği

Sicimlerin hareketiyle ilgili önceki tartışmamız sırasında, sarılmamış sicimlere odaklanmıştık. Uzayın dairesel bir bileşenini saran sicimler, daha önce incelediğimiz sicimlerle neredeyse tamamen aynı özelliklere sahiptir. Bu sicimlerin sahnımları da, tıpkı sarılmamış sicimlerin salınımları gibi, gözlenen özelliklerine katkıda bulunur. Aralarındaki esas fark, sarılmış bir sicimin *minimum* bir kütlesinin olmasıdır; bu kütleyi dairesel boyutun *büyüklüğü* ve sicimin bu dairesel boyutu kaç kez sardığı belirler. Sicimin salınım hareketi bu minimum kütleyi biraz artırır.

Bu minimum kütlenin kaynağını anlamak zor değildir. Sarılmış bir sicimin minimum bir uzunluğu vardır; bu uzunluğu dairesel boyutun çevresi ve sicimin dairesel boyutu kaç kez çevrelediği belirler. Sicimin minimum uzunluğu, sicimin minimum kütlesini belirler: Bu uzunluk ne kadar fazlaysa, kütle de o kadar büyüktür, çünkü sicim o kadar daha büyük demektir. Bir dairenin çevresi yarıçapıyla doğru orantılı olduğundan, sardmış haldeki minimum kütleler de etrafına sarıldıkları dairenin yarıçapıyla doğru orantılıdır. Einstein'ın kütleyi enerjiyle ilişkilendiren $E=mc^2$ formülünü kullanarak, sarılmış bir sicimdeki enerjinin, dairesel boyutun yarıçapıyla doğru orantılı olduğunu da söyleyebiliriz. (Sarılmamış sicimlerin de çok küçük bir minimum uzunluğu vardır; öyle olmasaydı nokta parçacıkların alanına dönmüş olurduk. Aynı akıl yürütmeyle, sarılmamış sicimlerin bile çok çok küçük, fakat sıfırdan farklı bir kütleye sahip olduğu sonucuna varabiliriz. Bu bir anlamda doğrudur, fakat VI. Bölüm'de karşılaştığımız kuantum mekaniği etkileri -yine *Price is Right'ı* hatırlayalım- kütleye yapılan bu katkıyı tam olarak iptal edebilir. Sarılmamış sicimlerin, örneğin sıfır kütleli fotonu, gravitonu ve diğer kütlesiz ve neredeyse kütlesiz parçacıkları bu şekilde ortaya çıkardığını biliyoruz. Sarılmış sicimler bu bakımdan farklıdır.)

Sarılmış sicim şekillerinin varlığı, sicimlerin sardığı boyutun *geometrik* özelliklerini nasıl etkiler? İlk olarak 1984'te Japon fizikçiler Keiji Kikkawa ile Masami Yamasaki'nin bulduğu cevap çok tuhaf ve dikkat çekicidir.

Büyük çöküşün Bahçe Hortumu evrendeki versiyonunun, kıyameti andıran son aşamalarını bir düşünelim. Genel göreliliğe göre dairesel boyutun yarıçapı Planck uzunluğuna kadar küçülüp daha da küçülmeyi sürdürür; sicim kuramıysa aslında neler olduğunu kökten yeniden yorumlamamız gerektiği üzerinde durur. Sicim kuramının iddiası şudur: Dairesel boyutun yarıçapının Planck uzunluğundan kısa olduğu ve kısalmaya devam ettiği Bahçe Hortumu evrende *bütün* fiziksel süreçler, dairesel boyutun Planck uzunluğundan daha uzun olduğu ve uzamaya devam ettiği fiziksel süreçlerle mutlak olarak aynıdır! Bu da dairesel boyut Planck uzunluğunu geçip daha da küçülmeye ve çökmeye çalışırken, bu çabanın durumu geometrinin aleyhine çeviren sicim kuramı tarafından etkisizleştirildiği anlamına gelir. Sicim kuramı bu gelişmenin, dairesel boyutun önce Planck uzunluğuna inmesi, sonra genişlemeye başlaması olarak yeniden ifade edilebileceğini -tam olarak yeniden yorumlanabileceğini- göstermiştir. Sicim kuramı kısa mesafe geometrisinin yasalarını yeniden yazar, öyle ki önceden tam bir kozmik çöküş olarak görülen şey artık kozmik bir *patlama* olarak görülmektedir. Dairesel boyut Planck uzunluğu kadar küçülebilir. Fakat sarmal hallerden dolayı, daha da küçülme girişimleri aslında genişlemeyle sonuçlanacaktır. Sebebini görelim.

Sicim Halleri Yelpazesi

Sicimlerin sarılmış halde de bulunabilme olasılığı, Bahçe Hortumu evrendeki bir sicimin enerjisinin *iki* kaynaktan geldiğini gösterir: Titreşimli hareket ve sarmalama enerjisi. Kaluza ile Klein'ın mirasına göre, bunların ikisi de hortumun geometrisine, yani hortumun kıvrılmış dairesel bileşeninin yarıçapına dayanmaktadır, fakat bu belirgin bir biçimde sicimlere özgüdür; çünkü nokta parçacıklar hortumun boyutlarını saramaz. O halde ilk işimiz sarmalama enerjisinin ve titreşimin, sicimin enerjisine katkısının dairesel boyutun büyüklüğüne tam olarak nasıl bağlı olduğunu belirlemek olacak. Bu amaçla, sicimlerin titreşim hareketlerini iki gruba ayırmak uygun: *Birörnek* ve *sıradan* titreşimler. Sıradan titreşimler, Şekil 6.2'de de görülen, tekrar tekrar bahsettiğimiz olağan sahnımları ifade eder. Birörnek titreşimlerse daha da basit bir hareketi ifade eder: Sicimin

şeklini değiştirmeden, bir yerden diğerine kayarken yaptığı hareket. Bütün sicim hareketleri kaymanın ve salınmanın -birörnek ve sıradan titreşimlerin- bir bileşimidir, fakat şimdi tartıştığımız konu açısından sicimlerin hareketlerini bu şekilde ayırmak işimizi kolaylaştıracaktır. Aslına bakarsanız, sıradan titreşimler akıl yürütmemizde çok önemli bir rol oynamayacak, dolayısıyla bu titreşimlerin etkilerine, savın özünü ortaya koyduktan sonra değineceğiz.

İşte iki temel gözlem. İlki, bir sicimin birörnek titreşimlerinin enerjisi, dairesel boyutun yarıçapıyla *ters* orantılıdır. Bu, kuantum mekaniğinin belirsizlik ilkesinin doğrudan bir sonucudur: Yarıçap küçülürse sicim daha katı bir biçimde sınırlanır, dolayısıyla -kuantum mekaniğine özgü "kapalı yer korkusu" yüzünden- hareketinin enerjisini artırır. Yani dairesel boyutun yarıçapı küçüldükçe, sicimin hareketinin enerjisi mutlaka artar; bu ters orantılı olmanın ayırt edici özelliğidir. İkincisi, bir önceki kısımda da gördüğümüz gibi, sarmal hal enerjisi yarıçapla -ters değil- *doğru* orantılıdır. Bunun, sarılmış sicimlerin minimum uzunluğunun, dolayısıyla da minimum enerjilerinin yarıçapla doğru orantılı olduğu için böyle olduğunu unutmayın. Bu iki gözlem, yarıçapın büyük değerlere sahip olmasının sarmalama enerjilerinin büyük, titreşim enerjilerinin küçük olması, yarıçapın küçük değerlere sahip olmasının da sarmalama enerjilerinin küçük, titreşim enerjilerinin büyük olması anlamına geldiğini ortaya koyar.

Bütün bunlar da bizi kilit olguya götürüyor: Bahçe Hortumu evrendeki her büyük dairesel yarıçapa karşılık gelen, büyükyarıçaplı evrendeki sicimlerin sarmalama enerjilerinin küçük yarıçaplı evrendeki sicimlerin titreşim enerjilerine, büyük yarıçaplı evrendeki sicimlerin titreşim enerjilerinin de küçük yarıçaplı evrendeki sicimlerin sarmalama enerjilerine eşit olduğu küçük bir dairesel yarıçap vardır. Fiziksel özellikler, bir sicimin şeklinin *toplam* enerjisine -bu enerjiye titreşimin ne kadar, sarmal hareketin ne kadar katkıda bulunduğuna değil- duyarlı olduğundan, Bahçe Hortumu evren için *geometrik olarak farklı* bu biçimler arasında *hiçbir fiziksel fark* yoktur. İşin tuhafı, sicim kuramı "dolgun" bir Bahçe Hortumu evrenle "ince" bir Bahçe Hortumu evren arasında hiçbir fark olmadığı iddiasındadır.

Kozmik bir çoklu bahis yani. Akıllı biryatırımcı olarak şöyle bir durumla karşılaştığınızda yapmanız gereken şeye benziyor biraz. Diyelim ki Wall Street'te işlem gören iki hisse senedinin -örneğin biri egzersiz aletleri üreten bir şirkete, diğeri de kalp bypass ameliyatlarında kullanılan ventilleri üreten bir şirkete ait olsun-kaderinin ayrılmaz biçimde birbirine bağlı olduğunu öğrendiniz. Bugün borsanın kapanışında iki şirketin de hisseleri bir dolardan işlem görüyordu; güvenilir bir kaynak da size birinin hisselerinin değeri yükselirse diğerinin hisselerinin değer kaybedeceğini ya da tersinin olacağını söyledi. Ayrıca kaynağınız -tam anlamıyla güvenilir bir kaynak, ama yol göstericiliği yasal sınırları aşıyor olabilir- ertesi gün bu iki hissenin kapanış fiyatlarının kesinlikle birbiriyle ters orantılı bir ilişki içinde olacağını da haber verdi. Yani bir şirketin hisseleri kapanışta 2 dolardan işlem görüyorsa, öbürünün hisseleri 1/2 dolardan (50 sent), birinin hisseleri kapanışta 10 dolardan işlem görüyorsa, öbürünün hisseleri 1/10 dolardan (10 sent) işlem görecekti vs. Fakat kaynağınız hangi hissenin yüksek hangisinin düşük fiyattan kapanacağını söylemedi. Ne yaparsınız?

Herhalde bütün paranızı bu iki şirketin hisseleri arasında eşit olarak pay edip derhal borsaya yatırırsınız. Birkaç örneği kontrol edince siz de görürsünüz ki, ertesi gün ne olursa olsun yatırımınız değer kaybedemez. En kötü ihtimalle aynı kalır (iki şirketin hisseleri kapanışta tekrar 1 dolardan işlem görecek olursa), fakat hisse fiyatlarındaki herhangi bir hareket -köstebeğinizin verdiği bilgiyle tutarlı olarak- birikiminizi artıracaktır.

Örneğin egzersiz aletleri üreten şirketin hisseleri günü 4 dolardan, kalp ventilleri üreten şirketin hisseleri 1/4 dolardan (25 sent) kapatırsa, ikisinin bileşik değeri 4,25 dolar eder (her hisse çifti için), oysa önceki gün bu değer 2 dolardı. Ayrıca net gelir açısından bakarsanız, egzersiz aletleri üreten şirketin hisseleri mi yükselmiş kalp ventilleri üreten şirketin hisseleri mi düşmüş ya da tam tersi mi olmuş, hiç önemi yoktur. Yalnızca paranızın toplam miktarıyla ilgileniyorsanız, bu birbirinden tamamen farklı iki koşul mali açıdan tamamen aynıdır.

Sicim kuramındaki durum da, sicim şekillerindeki enerjinin, sicimin toplam enerjisine katkıları genellikle farklı olan iki kaynaktan -titreşim ve sarmalama- gelmesi açısından buna benzer. Fakat birazdan daha ayrıntılı olarak göreceğimiz üzere, birbirinden farklı bazı geometrik koşul çiftleri -yüksek sarmalama enerjisi/düşük titreşim enerjisi ya da düşük sarmalama enerjisi/yüksek titreşim enerjisi çiftleri- *fiziksel* olarak ayırt edilemez. Finans dünyasından verdiğimiz, iki hisse senedi arasında ayrım yapmanın ancak toplam zenginlik dışında bir değerlendirmeye gidildiğinde mümkün olduğu örneğin tersine, iki sicim senaryosu arasında kesinlikle hiçbir fiziksel farklılık yoktur.

Örneğimizle sicim kuramı arasındaki benzerliği biraz daha artıralım ve başlangıçta yatırım yaparken paranızı iki şirketin hisseleri arasında eşit olarak bölmeyip de diyelim egzersiz aletleri üreten şirketin 1000 hissesini, kalp ventilleri üreten şirketin de 3000 hissesini almış olsaydınız ne olurdu, diye düşünelim. Bu durumda toplam birikiminiz günü hangi şirketin yüksek, hangi şirketin düşük değerden kapatacağına bağlıdır. Örneğin hisselerin biri günü 10 dolardan (egzersiz aletleri), diğeri 10 sentten (kalp ventilleri) kapatırsa, baştaki 4000 dolarlık yatırımınız 10.300 dolar olacaktır. Tersi olursa -hisseler günü 10 sentten (egzersiz aletleri) ve 10 dolardan (kalp ventilleri) kapatırsa- birikiminizin değeri 30.100 dolar olacaktır, yani çok daha fazla.

Yine de hisse senetlerinin kapanış fiyatları arasındaki ters orantılı ilişki şunu garantiler: Bir arkadaşınız sizin yaptığınızın tam "tersi" bir yatırım yaparsa -yani egzersiz aletleri şirketinin 3000 hissesini, kalp ventili şirketinin 1000 hissesini satın alırsa- birikiminin toplam değeri, kapanışta ventil yüksek/egzersiz aletleri düşük olursa 10.300 dolar (kapanışta egzersiz aletleri yüksek/ventil düşük olması halinde siz de aynı miktarda kazanacaktınız), egzersiz aletleri yüksek/ventil düşük olursa 30.100 dolar (karşılık gelen durumda sizin birikiminizle yine aynı miktarda) olacaktır. Demek oluyor ki hisselerin toplam değeri açısından bakıldığında, hangi şirketin yüksek değerden, hangi şirketin düşük değerden kapanacağının karşılıklı olarak değişmesi, sahip olduğunuz hisselerin sayısının karşılıklı olarak değişmesiyle telafi edilmiş olur.

Bu son gözlemi aklınızda tutun, çünkü şimdi sicim kuramına dönüp belirli bir örnekteki olası sicim enerjileri üzerine düşüneceğiz. Örneğin Bahçe Hortumu evrenin dairesel boyutunun yarıçapı Planck uzunluğunun 10 katı olsun. Bunu *R=10* diye yazacağız. Bir sicim bu dairesel boyutun çevresini bir kere, iki kere, üç kere vs. sarabilir. Bir sicimin dairesel boyutun çevresini kaç kere sardığı *sarmal sayısı* ifadesiyle anlatılır. Sarılmış sicimin uzunluğuna bağlı olan sarmalama enerjisi, yarıçap ile sarmal sayısının *çarpımıyla* doğru orantılıdır. Ayrıca sarmal sayısı ne olursa olsun, sicim titreşim hareketi yapabilir. Şimdi incelediğimiz birörnek titreşimlerin enerjisi yarıçapa ters bir orantıyla bağlı olduğundan, enerjileri karşılık gelen yarıçapın *(1/R)* tam sayı kadarıyla doğru orantılıdır; bu örnekte bu değer Planck uzunluğunun onda biridir. Bu tam sayı kata da *titreşim sayısı* deriz.

Gördüğünüz üzere bu durum, sarmal sayısının ve titreşim sayısının iki şirketin hisselerine, R ile *1/R*'nin de iki şirketteki hisselerin her birinin kapanış fiyatlarına karşılık gelmesi açısından Wall Street'te karşılaştığımız duruma çok benziyor. Şimdi, tıpkı elinizdeki hisse sayısını ve bunların kapanış fiyatlarını kullanarak yatırımınızın toplam değerini kolayca hesaplayabileceğiniz gibi, bir sicimin taşıdığı toplam enerjiyi de titreşim sayısını, sarmal sayısını ve yarıçapı kullanarak hesaplayabiliriz. Tablo 10.1'de, yarıçapı R=10 olan bir Bahçe Hortumu evrendeki sarmal sayılarına ve titreşim sayılarına göre nitelendirdiğimiz çeşitli sicim şekillerinin toplam enerjilerini gösteren kısmi bir liste verdik.

Titreşim sayısı	Sarmal sayısı	Toplam enerji
1	1	1/10 + 10 = 10,1
1	2	1/10 + 20 = 20,1
1	3	1/10 + 30 = 30,1
1	4	1/10 + 40 = 40,1
2	1	2/10 + 10 = 10,2
2	2	2/10 + 20 = 20,2
2	3	2/10 + 30 = 30,2
2	4	2/10 + 40 = 40,2
3	1	3/10 + 10 = 10,3
3	2	3/10 + 20 = 20,3
3	3	3/10 + 30 = 30,3
3	4	3/10 + 40 = 40,3
4	1	4/10 + 10 = 10,4
4	2	4/10 + 20 = 20,4
4	3	4/10 + 30 = 30,4
4	4	4/10 + 40 = 40,4

Tablo 10.1 Şekil 10.3'te gösterilen R= 10 yarıçaplı bir evrende hareket eden bir sicim için örnek titreşim ve sarmalama şekilleri. Titreşim enerjileri 1/10'un katları olarak, sarmalama enerjileri de 10'un katları olarak katkıda bulunur ve sonuçta tabloda sıralanan toplam enerjiler ortaya çıkar. Enerji birimi Planck enerjisidir, dolayısıyla örneğin sağdaki sütunda yer alan 10,1 ifadesi Planck enerjisinin 10,1 katı anlamına gelmektedir.

Sarmal sayıları ve titreşim sayıları rasgele tam sayı değerler alabileceği için, tablonun tamamı sonsuz uzunlukta olurdu; fakat tablonun örnek olarak verdiğimiz kısmı buradaki tartışmamız açısından yeterlidir. Tablodan ve söylediklerimizden, yüksek sarmalama enerjili/düşük titreşim enerjili bir durumda olduğumuzu anlıyoruz. Sarmalama enerjilerinin 10'un katları, titreşim enerjilerinin de daha küçük bir sayı olan 1/10'un katlan olduğunu görüyoruz.

Titreşim sayısı	Sarmal sayısı	Toplam enerji
1	1	10 + 1/10 = 10,1
1	2	10 + 2/10 = 10,2
1	3	10 + 3/10 = 10,3
1	4	10 + 4/10 = 10,4
2	1	20 + 1/10 = 20,1
2	2	20 + 2/10 = 20,2
2	3	• 20 + 3/10 = 20,3
2	4	20 + 4/10 = 20,4
3	1	30 + 1/10 = 30,1
3	2	30 + 2/10 = 30,2
3	3	30 + 3/10 = 30,3
3	4	30 +4/10 = 30,4
4	1	40 + 1/10 = 40,1
4	2	40 + 2/10 =40,2
4	3	40 + 3/10 = 40,3
4	4	40 + 4/10 =40,4

Tablo 10.2 Tablo 10.1'deki gibi, aradaki tek fark çapın 1/10 olması.

Şimdi dairesel boyutun yarıçapının 10'dan diyelim 9,2 ye, sonra 7,1'e indiğini, sonra da 3,4'e, 2,2'ye, 1,1'e, 0,7ye ve sonunda da 0,1'e (1/10) indiğini düşünelim; tartışmamız açısından yarıçapın küçülmesi burada dursun. Bahçe Hortumu evrenin geometrik olarak farklı olan bu biçiminde de, sicim enerjileri için benzer bir tablo derleyebiliriz: Sarmalama enerjileri artık 1/10'un katlarıdır, titreşim enerjileri de 1/10'a karşılık gelen 10'un katlarıdır. Sonuçlar Tablo 10.2'de gösterilmiştir.

İlk bakışta iki tablo birbirinden farklıymış gibi görünebilir. Fakat yakından incelendiğinde, farklı bir biçimde düzenlenmiş olsalar da, her iki tablodaki "toplam enerji" sütunlarında *aynı* değerlerin yer aldığı görülür. Tablo 10.1'den seçtiğimiz bir değerin Tablo 10.2'deki karşılığını bulmak için yalnızca titreşim sayılarının ve sarmal sayılarının yerlerini değiştirmemiz gerekir. Demek oluyor ki, dairesel boyutun yarıçapı 10'ken 1/10 olduğunda titreşim ve sarmalama katkıları birbirini tamamlayıcı roller oynar. Bu yüzden de, toplam

sicim enerjisi açısından, dairesel boyutun bu farklı büyüklükleri arasında *hiçbir fark* yoktur. Egzersiz aletleri yüksek/ventil düşük durumun yerini, ventil yüksek/egzersiz aletleri düşük durumun alması halinde, iki şirketteki hisselerinizin sayısını birbirleriyle değiştirerek durumdaki bu değişikliği tamamen telafi edebilmeniz gibi, yarıçapın 10'ken 1/10 olması halinde de, titreşim sayıları ile sarmal sayılarının yerini değiştirmek bu yarıçap değişikliğini tamamen telafi edecektir. Ayrıca basit olsun diye başta yarıçapı *R=10,* karşılığını da 1/10 olarak almıştık, ama yarıçap ve karşılığı için hangi sayı seçilirse seçilsin elde edilen sonuç aynı olacaktır.

Tablo 10.1 ve 10.2 iki sebepten eksiktir. Öncelikle, daha önce belirtmiş olduğumuz gibi, bir sicimin sahip olabileceği sonsuz sayıdaki sarmal sayısı/titreşim sayısı olasılıklarından yalnızca birkaçını listemize aldık. Bu bir sorun oluşturmuyor, çünkü tabloları sabrımız elverdiğince uzatıp aralarındaki ilişkinin aynı kaldığını görebiliriz. İkincisi, buraya dek sarmalama enerjisi dışında yalnızca bir sicimin birörnek titreşim hareketinden doğan enerji katkılarını dikkate aldık. Şimdi, sıradan titreşimleri de dahil etmemiz gerekiyor, çünkü bunlar sicimin toplam enerjisine ek katkılarda bulunur ve sicimin taşıdığı kuvvet yükünü de belirler. Gelgelelim önemli olan, yapılan araştırmaların bu katkıların yarıçapın büyüklüğüne bağlı olmadığını göstermiş olmasıdır. Nitekim, sicimlerin özniteliklerinin bu daha ayrıntılı özelliklerini Tablo 10.1'e ve 10.2'ye dahil etseydik dahi, tablolar yine tam anlamıyla birbirine denk düşerdi, çünkü sıradan titreşimlerin katkıları tabloların ikisini de aynı biçimde etkilerdi. Dolayısıyla yarıçapı R olan bir Bahçe hortumu evrendeki parçacıkların kütleleri ve yükleriyle tamamen aynı olduğu sonucuna varırız. Temel fiziği bu kütleler ve kuvvet yükleri yönlendirdiği için de, geometrik olarak birbirinden tamamen farklı bu iki evreni fiziksel olarak ayırt etmek mümkün değildir. Böyle bir evrende yapdan herhangi bir deneyin, diğer evrende de yapılabilecek ve tamamen aynı sonuçları verecek bir karşılığı vardır.

Bir Tartışma

George de Gracie düzleşip ikiboyutlu varlıklar haline geldikten sonra Bahçe Hortumu evrene yerleşip fizik profesörlüğü yapmaya başlarlar. Birbirine rakip iki laboratuvar kurarlar, ikisi de dairesel boyutun yarıçapını belirlediği iddiasındadır. İkisinin de çok titiz araştırmacılar olduğu bilindiği halde, şaşırtıcı bir şekilde, vardıkları sonuçlar uyuşmamaktadır. George dairesel yarıçap için R=Planck uzunluğunun 10 katı, Gracie ise R=Planck uzunluğunun 1/10 katı demektedir.

George şöyle der: "Gracie, sicim kuramı hesaplarıma göre, eğer dairesel boy utun yarıçapı 10 ise sicimlerin enerjisinin Tablo 10.1'de verilen değerlerde olması gerektiğini biliyorum. Yeni Planck enerjili hızlandırıcıyı kullanarak kapsamlı deneyleryap-tım ve bu deneyler tahminimi kesinlikle doğruluyor. Dolayısıyla, kendimden gayet emin olarak iddia ediyorum ki, dairesel boyutun yarıçapı R = 10'dur." Gracie de kendi iddiasını savunurken tıpatıp aynı şeyleri söyler, ama o sonuçta Tablo 10.2'de gösterilen enerji değerlerini elde etmiştir, bu da yarıçapın R = 1/10 olduğunu doğrulamaktadır.

Kafasında birden bir ampul yanan Gracie, George'a farklı biçimde düzenlenmiş olsalar da iki tablonun aslında aynı olduğunu söyler. Gayet iyi bildiğimiz üzere Gracie'den biraz dahaya-vaş akıl yürüten George o zaman "Nasıl olur? Temel kuantum mekaniği ve sarılmış sicimlerin özelliklerini bildiğim için, yarıçapın farklı değerlere sahip olmasının sicimlerin enerjileri ve yükleri için farklı olası değerlere yol açtığını biliyorum. Eğer sicimlerin enerjileri ve yükleri konusunda anlaşıyorsak, yarıçapta da anlaşmamız gerekir." der.

Gracie sicim fiziğiyle ilgili yeni edindiği kavrayışı kullanarak George'u şöyle cevaplar: "Söylediklerin neredeyse doğru, ama tam doğru değil. Yarıçapın iki ayrı değerde olmasının, mümkün olan enerji seviyelerinin farklı olmasına yol açtığı *genellikle* doğrudur. Ancak yarıçapa verilen iki değerin birbiriyle ters orantılı olması (10 ve 1/10) gibi özel bir durumda, mümkün olan enerjiler ve yükler aslında birbirinin aynıdır. Baksana, senin sarmalama hali dediğin şeye ben titreşim hali, titreşim hali dediğin şeye sarmalama hali diyorum. Ama doğa kullandığımız dile bakmaz. Tersine, fiziği *temel bileşenlerin*

özellikleri -parçacıkların kütleleri (enerjileri) ve taşıdıkları kuvvet yükleri- yönlendirir. Yarıçapın R olduğu durumda da, *1/R* olduğu durumda da, sicim kuramındaki temel bileşenlerin bu özelliklerinin tamamı aynıdır."

George, bir an durumu kavrayarak Gracieyi cevaplar: "Galiba anladım. Senin ve benim sicimler için verebileceğimiz ayrıntılı betimlemeler birbirinden farklı olsa da sahip olabilecekleri fiziksel özelliklerin -dairesel boyutun etrafına sarılmış olup olmadıkları ya da titreşim hareketlerinin özellikleri- tamamı aynıdır. Dolayısıyla da, evrenin fiziksel özellikleri temel bileşenlerin bu özelliklerine dayandığından, birbiriyle ters orantılı yarıçaplar arasında hiç fark yoktur ve bu yarıçapları birbirinden ayırmak mümkün değildir." Aynen öyle.

Üç Soru

Bu noktada şöyle diyebilirsiniz: "Baksana, Bahçe Hortumu evrende küçük bir varlık olsaydım, hortumun çevresini bir mezurayla ölçüp hiçbir belirsizliğe yer bırakmadan, 'eğer', 've', 'ama' demeden yarıçapı belirlerdim. Yarıçapları farklı, ama birbirinden farkı olmayan iki olasılık da ne demek oluyor? Hem sonra, sicim kuramı Planck-altı mesafeleri bir kenara bırakmamış mıydı? O zaman neden yarıçapları ancak Planck uzunluğu -nun bir kesiri kadar olan dairesel boyutlardan bahsediyoruz? Hazır sırası gelmişken, ikiboyutlu Bahçe Hortumu evren kimin umurunda ki? *Bütün* boyutları işin içine kattığımızda nereye varıyoruz, siz onu anlatın."

Son sorudan başlayalım, çünkü onun cevabı bizi önceki iki soruyla karşı karşıya gelmek zorunda bırakacak.

Tartışmamız Bahçe Hortumu evrende geçiyor olsa da, basit olsun diye kendimizi biri uzamış biri de kıvrılmış iki uzamsal boyutla sınırlamıştık. Üç tane uzamış uzamsal boyutumuz, altı tane dairesel boyutumuz olsaydı da -bütün Calabi-Yau uzaylarının en basiti altı dairesel boyutlu olandır- sonuç aynıdır. Dairelerin her birinin çapı,

karşılığıyla değiştirildiğinde fiziksel olarak tamamen aynı evrenin oluşmasına yol açar.

Bu sonucu çok daha ileriye de götürebiliriz. Evrenimizde, gökbilimsel gözlemlere göre her biri 15 milyar ışık yılı uzunluğunda olan (bir ışık yılı 9,5 trilyon kilometredir, dolayısıyla bu mesafe de 142,5 milyar kere milyon kere milyon kilometredir) üç uzamsal boyut gözlüyoruz. VIII. Bölüm'de belirttiğimiz üzere, bundan sonra ne olduğuna dair bir ipucu yok. Bu boyutlar sonsuza kadar devam mı ediyor, yoksa acaba teknoloji harikası teleskopların görsel duyarlılığının ötesinde, kendi üstlerine kıvrılıp devasa bir daire mi oluşturuyorlar bilmiyoruz, ikinci durum geçerliyse, uzayda seyahat eden bir astronot sürekli sabit bir doğrultuda giderse sonunda evrenin çevresini dolaşıp -tıpkı Macellan'ın Dünyanın çevresini dolaşması gibi- başlangıç noktasına geri dönecektir.

Dolayısıyla bildiğimiz uzamış boyutlar da pekâlâ daire şeklinde olabilir ve yine dolayısıyla sicim kuramının *Rpe //R* fiziksel tanımlarına tabi olabilir. Kabaca rakamlarla konuşacak olursak, bildiğimiz boyutlar eğer daireselse, çapları yukarıda da belirttiğimiz gibi 15 milyar ışık yılı uzunluğunda olmalıdır; 15 milyar ışık yılı, Planck uzunluğunun 10 trilyon kere trilyon kere trilyon kere trilyon kere trilyon katıdır ($R = 10^{61}$), evren genişledikçe de büyümektedir. Sicim kuramı doğruysa, bu durum bildiğimiz boyutların yarıçaplarının yaklaşık $//R = 1/10^{61}$, yani Planck uzunluğunun 10^{61} gibi inanılmayacak kadar kısa bir uzunlukta olması halinde ortaya çıkacak dairesel evrenle fiziksel olarak tamamen aynıdır! *Bunlar şu bildiğimiz boyutlar, ama şimdi onları sicim kuramının sunduğu alternatif bir tanım çerçevesinde görüyoruz.* Aslına bakarsanız bu karşılıklı dilde, bu küçük daireler zamanla giderek ufalacaktır, çünkü R büyürken *1/R* küçülecektir. İşte şimdi gerçekten de her şey karıştı. Nasıl olur da böyle bir şey mümkün olabilir? Nasıl olur da 1,80 metre boyunda bir insan, böyle inanılmaz derecede mikro bir evrene "sığabilir"? Nasıl olur da zerre kadar bir evren, başımızı kaldırınca gördüğümüz o muazzam genişlikle fiziksel olarak tamamen aynı olabilir? Şimdi bir de başta sorduğumuz üç sorunun İkincisi var karşımızda: Sicim kuramının Planck-altı mesafeleri araştırma

becerisini bertaraf etmesi bekleniyordu. Ama dairesel bir boyut, Planck uzunluğundan daha uzun bir R yarıçapına sahipse, karşılığı olan *1/R* de mutlaka Planck uzunluğunun bir ke-siri olacaktır. Neler oluyor? Sorduğumuz üç sorunun ilkiyle de ilgili olan cevabımız, uzayın ve mesafenin önemli ve hemen fark edilmeyen bir yönüne dikkat çekiyor.

Sicim Kuramında Birbirine Bağlı İki Mesafe Kavrayışı

Mesafe, dünyayı kavrayışımızda öyle temel bir kavramdır ki, ne kadar ince ayrıntılar barındırdığını gözden kaçırmak çok kolaydır. Özel ve genel görelilik kuramlarının uzay ve zaman kavrayışlarımızda yol açtığı şaşırtıcı etkiler ve sicim kuramından doğan yeni özellikler, mesafeyi daha tanımlarken bile bizi dikkatli olmaya zorlar. Fizikteki en anlamlı tanımlar işlemsel tanımlardır, yani en azından prensipte, tanımlanan şeyi ölçmenin bir yolunu sunan tanımlar. Ne de olsa, bir kavram ne kadar soyut olursa olsun elimizde işlemsel bir tanımının olması, o kavramın anlamını, kavramın değerini ölçebileceğimiz deneysel bir sürece dönüştürmemizi mümkün kılar.

Mesafe kavramının işlemsel bir tanımını nasıl yapabiliriz? Sicim kuramı bağlamında bu sorunun cevabı bir hayli şaşırtıcıdır. 1988'de iki fizikçi, Brown Üniversitesi'nden Robert Branden-berger ile Ffarvard Üniversitesinden Cumrun Vafa, eğer bir boyutun uzamsal şekli daireselse, sicim kuramında birbirinden farklı ancak birbiriyle ilişkili, işlemsel iki mesafe tanımı olacağını göstermişti. Bu tanımların ikisi de, mesafenin ölçülmesi için farklı bir deneysel süreç ortaya koyar ve iki süreç de kabaca söyleyecek olursak, eğer bir sonda sabit ve bilinen bir hızdayol alıyorsa, belli bir mesafeyi, parçacığın o mesafeyi ne kadar zamanda kat ettiğini belirleyerek ölçebilecek olmamız gibi basit bir ilkeye dayanır. İki süreç arasındaki fark kullanılan sondadadır. İlk tanımda dairesel bir boyuta *sarılmamış* sicimler, ikinci tanımdaysa dairesel bir boyuta *sarılmış* sicimler kullandır. Görüyoruz ki, sicim kuramında mesafeye dair işlemsel iki doğal tanım olmasının gerisinde temel sondanın boyuta sahip olma

özelliği vardır. Sarmalama kavramının olmadığı nokta parçacık kuramında, mesafenin tek bir işlemsel tanımı olacaktır.

Bu iki sürecin sonuçları arasında nasıl bir fark vardır? Brandenberger ve Vafa'nın bulduğu cevap hemen anlaşılabilir olmadığı gibi şaşırtıcıdır da. Sonucun ardındaki ilk fikir, belirsizlik ükesine başvurularak anlaşılabilir. Sarılmamış sicimler serbestçe hareket ederek dairenin R ile doğru orantılı olan çevresini dolaşabilir. Belirsizlik ilkesine göre, sicimlerin enerjileri *1/R* ile doğru orantılıdır (Hatırlarsanız VI. Bölüm'de sondanın enerjisi ile duyarlı olduğu mesafeler arasında ters orantılı bir ilişki olduğundan bahsetmiştik). Öte yandan sarılmış sicimlerin minimum enerjisinin -R'yle doğru orantılı olduğunu görmüştük; belirsizlik ilkesi bu sicimlerin sonda olarak R'nin karşılığına, yani l/R'ye duyarlı olduğunu söyler. Bu fikrin matematiksel olarak somutlaşması, eğer her ikisi de dairesel boyutun yarıçapını ölçmekte kullanılırsa, sarılmamış sicimlerin yarıçapı R olarak, sarılmış sicimlerin *1/R* olarak ölçeceğini gösterir; daha önce olduğu gibi burada da mesafeleri Planck uzunluğunun kadarıyla ölçüyoruz.

İki deneyde de varılan sonuçlar aynı derecede geçerlilik iddiası taşımaktadır. Mesafe ölçmek için farklı sondalar kullanıldığında farklı cevaplar alacağımızı sicim kuramından öğrenmiştik. Aslına bakarsanız bu özellik, yalnızca dairesel bir boyutun büyüklüğünün belirlenmesinde değil, bütün uzunluk ve mesafe ölçümleri için geçerlidir. Sarılmış ve sarılmamış sicimlerden oluşan sondalarla elde edilen sonuçlar birbirleriyle ters orantılı bir ilişki içinde olacaktır.

Eğer sicim kuramı evrenimizi tanımlıyorsa, bu olası iki mesafe kavramıyla gündelik hayatta ya da bilimsel uğraşlarımızda neden hiç karşılaşmadık acaba? Ne zaman mesafeden bahset-sek, hep bir tek mesafe kavramının olduğu, ikinci bir mesafe kavramanın olması ihtimalinin bile olmadığı yönündeki deneyimimizle uyuşan bir tarzda konuşuyoruz. Alternatif olasılığı neden gözden kaçırmışız? Bu sorunun cevabı şu: Tartışmamızda yüksek derecede bir simetri olsa da, *R'yi* (dolayısıyla1/R'nin de) 1'den (yani Planck uzunluğunun 1 katı) önemli ölçüde farklı olması halinde, işlemsel tanımlarımızdan

birini uygulamak son derece güçken, diğerini uygulamak son derece kolaydır. Esasında başka bir olasılık daha olduğundan tümüyle habersiz bir halde, daima kolay yaklaşımı uygulamışızdır.

İki yaklaşımın zorluk derecelerinin farklı olmasının nedeni, R yarıçapının (dolayısıyla 1/R'nin de) Planck uzunluğundan (yani R=1'den) çok farklı olması durumunda kullanılan sondaların (yüksek sarmalama enerjili/düşük titreşim enerjili ve tersi) kütlelerinin çok farklı olmasıdır. Planck uzunluğundan çok farklı yarıçaplar söz konusu olduğunda, "yüksek" enerji inanılmaz derecede büyük kütleli sondalara (örneğin protondan milyar kere milyar kat daha ağır parçacıklara), "düşük" enerji ise sıfırdan en fazla bir zerre fazla bir kütlesi olan sondalara karşılık gelir. Bu koşullarda, iki yaklaşımın zorluk derecesi arasındaki fark çok çok büyüktür, çünkü ağır sicim şekillerini üretmek bile bugünkü teknolojik yetilerimizin ötesindedir. O halde, iki yaklaşımdan yalnızca biri teknolojik olarak uygulanabilir: İki sicim şeklinden hafif olanın kullanıldığı yaklaşım. Bu yaklaşım, buraya kadar mesafeyle ilgili bütün tartışmalarımızda üzeri örtük olarak kullanılan yaklaşımdır. Bize bilgi veren ve sezgilerimizle uyuşan yaklaşım budur.

Uygulanabilirlikle ilgili konuları bir kenara bırakırsak, sicim kuramının yönlendirdiği bir evrende mesafeleri bu iki yaklaşımdan birini kullanarak ölçmekte serbestiz. Gökbilimciler "evrenin büyüklüğünü" ölçerken, bunu kozmosta dolaşan ve tesadüfen teleskoplarının menziline giren fotonları inceleyerek yapar. Şaka yapmıyorum, bu durumda fotonlar sicimlerin hafif halleridir. Elde edilen sonuç, daha önce de bahsettiğimiz üzere Planck uzunluğunun 10^{61} katıdır. Bizim için tanıdık olan üç uzamsal boyut gerçekten daireselse ve sicim kuramı da doğruysa, son derece farklı (ve halihazırda var olmayan) cihazlar kullanan gökbilimcilerin, prensipte, evrenin genişliğini sarılmış haldeki ağır sicimlerle ölçebilmesi ve bu büyük mesafenin karşılığı olan bir sonuca varması gerekir, işte bu anlamda, evreni ya normalde yaptığımız gibi çok büyük ya da çok çok küçük olarak düşünebiliriz. Hafif sicim hallerine göre evren büyüktür ve genişlemektedir, ağır sicim hallerine göreyse küçüktür ve büzüşmektedir. Burada bir çelişki yoktur, aksine elimizde birbirinden

tamamen farklı, fakat aynı derecede anlamlı iki mesafe tanımı var. Teknolojik sınırlılıklar yüzünden ilk tanımı çok daha iyi biliyoruz, ama yine de iki tanım da aynı derecede geçerli kavramlardır.

Şimdi küçük evrendeki büyük insanlarla ilgili, daha önceden sorduğumuz soruyu cevaplayabiliriz. Örneğin, bir insanın boyunu ölçüp 1,80 metre olduğunu bulduğumuzda, mutlaka hafif sicim hallerini kullanmış olmamız gerekir. Hafif sicimlerin büyüklüğünü evrenin büyüklüğüyle karşılaştırabilmek için aynı ölçüm sürecini kullanmamız gerekir, buyöntem de yukarıda görüldüğü gibi, evrenin büyüklüğünün 15 milyar ışık yılı olduğu sonucunu verir; 1,80 metreden hayli büyük bir sonuç. Bu boyda bir insanın, ağır sicim halleriyle ölçülmüş "çok küçük" bir evrene nasıl sığacağını sormak, anlamsız bir soru sormaktır; elmalarla armutları karşılaştırmak gibi. Artık elimizde iki mesafe kavramı -sonda olarak hafifve ağır sicimlerin kullanıldığı- olduğuna göre, aynı yöntemle gerçekleştirilmiş ölçümleri karşılaştırmamız gerekir.

Minimum Bir Büyüklük

Biraz zor ilerlemiş olduk, ama artık kilit noktaya yaklaştık. Mesafelerin ölçümünde "kolay yola" bağlı kalınırsa -yani ağır sicim halleri yerine en hafif sicim halleri kullanılırsa- elde edden sonuçlar *her zaman* Planck uzunluğundan büyük olacaktır. Bunu anlayabilmek için, dairesel olduklarını varsaydığımız üç boyutun varsayımsal büyük çöküşünü düşünelim. Sırf tartışmayı ilerletmek için bu düşünsel deneyin başlangıcında diyelim ki, hafif sicimler sarılmamış sicim halleridir ve bu sicimler kullanılarak evrenin muazzam derecede büyük bir yarıçapı olduğu ve zaman içinde küçüldüğü belirlenmiştir. Evrenin yarıçapı küçülürken, bu sarılmamış sicim halleri ağırlaşır ve sarılmış haldeki sicimler de hafifler. Yarıçap giderek küçülüp Planck uzunluğuna indiğinde -yani R'nin değeri 1 olduğunda- sarmal hallerin ve titreşim hallerin kütleleri karşılaştırılabilir hale gelir. Mesafeyi ölçmekle ilgili iki yaklaşımı da hayata geçirmek aynı derecede zor olacaktır, dahası 1 kendi kendisinin karşılığı olduğundan ikisi de aynı sonucu verecektir.

Yarıçap küçülmeye devam ederken, sarmal haldeki sicimler sarılmamış sicim hallerinden daha hafif hale gelir, dolayısıyla da her zaman "kolay yaklaşımı" tercih ettiğimizden, artık mesafeleri ölçmek için *onların* kullanılması gerekir. Sarılmamış sicim halleriyle ölçülen sonucun *karşılığım* veren bu ölçüm yöntemine göre, yarıçap *Planck uzunluğunun 1 katından fabladır ve büyümektedir.* Bu durum, *R* (sarılmamış sicimlerle ölçülen miktar) 1'e inerken ve küçülmeyi sürdürürken, lAR'nin (sarılmış sicimlerle ölçülen miktar) 1'e çıktığını ve daha da büyüdüğünü açıkça gösterir. Dolayısıyla her zaman hafif sicim hallerinin -mesafe ölçmenin "kolay" yolunun- kullanılmasına özen gösterildiğinde, bulunan minimum değer Planck uzunluğu olacaktır.

Özellikle de, büyük çöküşle birlikte evrenin sıfır boyutuna inmesinden kaçınılmış olur, çünkü evrenin yarıçapı sonda olarak hafif sicim halleri kullanılarak ölçüldüğünde, her zaman Planck uzunluğundan büyük olacaktır. Evrenin yarıçapı -en hafif sicim halleriyle ölçüldüğünde- Planck uzunluğuna inip daha da küçüleceğine, Planck uzunluğuna iner ve sonra hemen büyümeye başlar. Çöküşün yerini bir zıplama alır.

Mesafeleri ölçmek için hafif sicim hallerinin kullanılması alı-şdageldik uzunluk kavrayışımızla, sicim kuramının keşfinin çok öncesinden beri geçerli olan kavrayışla uyumludur. V. Bölüm'de gördüğümüz üzere, Planck-altı ölçekteki mesafelerin fiziksel bir rol oynaması halinde, şiddetli kuantum dalgalanmalarının doğurduğu ve altından kalkamadığımız sorunla, işte *bu* mesafe kavrayışını benimsediğimizde karşılaşırız. Bu tamamlayıcı bakış açısıyla, bir kez daha sicim kuramı sayesinde ultra kısa mesafelerden kurtulduğumuzu görüyoruz. Genel göreliliğin fiziksel çerçevesine ve Riemann geometrisinin genel göreliliğe karşılık gelen matematiksel çerçevesine göre tek bir mesafe kavramı vardır; bu kavrama göre mesafeler rasgele küçük değerler alabilir. Sicim kuramının fiziksel çerçevesine ve buna bağlı olarak yeni ortaya çıkmakta olan kuantum geometrisine göreyse iki ayrı mesafe kavrayışı vardır. İkisini de mantıklı bir biçimde kullanarak mesafe ölçeklerinin büyük olduğu durumlarda hem sezgilerimize hem genel göreliliğe uyan, ama

mesafe ölçekleri küçük olduğunda sezgilerimize de genel göreliliğe de uymayan bir mesafe kavrayışına ulaşırız. Özellikle de Planck-altı ölçekteki mesafeler erişilmez olur.

Bu konu çok da kolay anlaşılmayan bir konu olduğundan, önemli bir noktayı bir kere daha vurgulayalım. Uzunluk ölçmeye dair "kolay" ve "zor" yaklaşımlar arasındaki farklılığı bir kenara bırakacak olsaydık ve diyelim ki R Planck uzunluğuna inerken uzunluk ölçmek için sarılmamış sicim hallerini kullanmayı sürdürseydik, gerçekten de Planck-altı ölçekte bir mesafeyle karşılaşabilirdik gibi görünebilir. Fakat yukarıdaki paragraflar bize son cümledeki "mesafe" sözcüğünün dikkatli bir biçimde yorumlanması gerektiğini söylüyor, çünkü bu sözcüğün sadece biri geleneksel kavrayışımıza uyan farklı iki anlamı olabilir. Bu durumda, R küçülüp Planck-altı uzunluklara indiğinde biz hâlâ sarılmamış sicimleri (artık sarılmış sicimlerden daha ağır hale gelmiş olmalarına rağmen) kullanmaya devam ediyorsak, mesafe ölçmeye dair "zor" yaklaşımı kullanıyoruz demektir, dolayısıyla da -mesafe'nin anlamı standart kullanıma *uymaz*- Fakat bu tartışma bir anlambilim tartışması, hatta uygun ve elverişli bir ölçüm yöntemi tartışması da değildir. Standart olmayan mesafe kavrayışını kullanmayı seçsek ve böylece yarıçapı Planck uzunluğundan kısa diye tanımlasak bile, karşımıza çıkacak olan *fizik* -daha önceki kısımlarda tartıştığımız üzere-yarıçapın, bizim için tanıdık olan mesafe kavrayışına göre Planck uzunluğundan daha büyük olduğu (örneğin Tablo 10.1 ile 10.2'nin tam anlamıyla birbirine denk düşmesinin kanıtladığı gibi) bir evrenin fiziğiyle aynı olacaktır. Asıl önemli olan dil değil, fiziktir.

Brandenberger, Vafa ve başka fizikçiler, kozmoloji yasalarını hem Büyük Patlama'da hem de olası bir büyük çöküşte sıfır büyüklükte bir evren değil de, bütün boyutları Planck uzunluğunda bir evren olacak şekilde yeniden yazarken bu fikirleri kullanmışlardı. Hiç kuşku yok ki bu, sonsuz derecede yoğun bir noktadan doğan ya da sonsuz derecede yoğun bir noktaya kadar çöken bir evrenin doğurduğu matematiksel, fiziksel ve mantıksal bilmecelerden kurtulmaya yönelik çok cazip bir öneridir. Bütün evrenin sıkışıp da Planck büyüklüğünde bir topak haline geldiğini düşünmek kavramsal olarak zor da olsa, hiç

büyüklüğü olmayan bir nokta oluşturana kadar çökeceğini düşünmek gerçekten imkânsızdır. IVX. Bölüm'de de tartışacağımız üzere sicim kozmolojisi henüz çok yenidir, fakat çok ümit vaat eden bir alandır; bize standart Büyük Patlama modelinin alternatifi olan, hazmedilmesi daha kolay bir model kazandırabilir pekâlâ.

Bu Sonuç Ne Kadar Genel?

Peki ya uzamsal boyutların şekli dairesel değilse? Sicim kuramındaki minimum uzamsal boyutlarla ilgili dikkat çekici sonuçlaryine geçerli olacak mı? Bu sorunun cevabını kimse kesin olarak bilmiyor. Dairesel boyutların en temel özelliği, sarılmış sicim olasılığına olanak vermeleridir. Uzamsal boyutlar -şekilleriyle ilgili ayrıntılar bir yana- sicimlerin bu boyutların etrafına sarılmasını mümkün kılıyorsa eğer, çıkardığımız sonuçların çoğu hâlâ geçerli olmalıdır. Peki, ya boyutlardan diyelim ikisi küre şeklindeyse? Bu durumda sicimler sarılmış bir şekle "kısılı" kalamaz, çünkü o durumda, nasıl ki bir basket topuna geçirilmiş bir lastik bant toptan kurtulabilirse, sicimler de her an "kayabilir". Sicim kuramı bu boyutların en fazla ne kadar küçülebileceğim yine de belirler mi?

Çok sayıda araştırma bu sorunun cevabının, bir uzamsal boyutun tamamının küçülmesine (bu bölümdeki örneklerde olduğu gibi) ya da (XI. ve XIII. Bölüm'de göreceğimiz ve açıklayacağımız gibi) uzayın yalıtılmış bir "parçasının" çökmesine bağlı olduğunu göstermiştir. Sicim kuramcıları arasındaki genel kanıya göre, şekli ne olursa olsun bir uzamsal boyutun tamamını küçülttüğümüz sürece sınırlayıcı bir minimum büyüklük *vardır,* tıpkı dairesel boyutlarda olduğu gibi. Bunu kanıtlamak, ileride yapılacak araştırmaların önemli bir hedefidir; çünkü bunun sicim kuramının birçok yönü üzerinde doğrudan bir etkisi olduğu gibi, kozmoloji üzerinde de vardır.

Ayna Simetrisi

Einstein, kütleçekimi fiziğiyle uzay-zaman geometrisi arasında genel görelilik üzerinden bir bağ kurmuştu, ilk bakışta, sicim kuramı fizik ile geometri arasındaki bağı güçlendirir ve genişletir, çünkü

titreşen sicimlerin özellikleri -kütleleri ve taşıdıkları kuvvet yükleri- büyük ölçüde uzayın kıvrılmış bileşeninin özellikleri tarafından belirlenir. Ama biraz önce kuantum geometrisinin -sicim kuramındaki geometri-fizik birlikteliği- bazı şaşırtıcı yönleri olduğunu gördük. Genel görelilikte ve "bildiğimiz" geometride, yarıçapı R olan bir daire, yarıçapı 1/R olan bir daireden farklıdır, bu gayet açık ve nettir; fakat sicim kuramında bu iki daire fiziksel olarak birbirlerinden ayırt edilemez. Bu da bize biraz daha deri gidip uzayın çok daha ciddi biçimde farklılaşabilen -yalnızca genel büyüklük itibarıyla değil, muhtemelen şeklen de- fakat yine de sicim kuramına göre fiziksel olarak birbirinden ayırt edilemeyen geometrik biçimleri olup olmadığını sorgulama cesareti veriyor.

1988'de Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezinden Lance Dixon bu konuda, CERN'den Wolfgang Lerche, Harvard'dan Vafa ve o zaman Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde görevli olan Nicholas Warner tarafından daha da ayrıntılandırılan, çok önemli bir gözlemde bulundu. Bu fizikçiler kökü simetri değerlendirmelerine uzanan estetik savlara dayanarak, sicim kuramındaki kıvrılmış fazladan boyutlar için seçilmiş olan farklı iki Calabi-Yau şeklinin tamamen aynı fiziklere yol açmasının mümkün olabileceği yönünde çok cesurca bir iddia ortaya attılar.

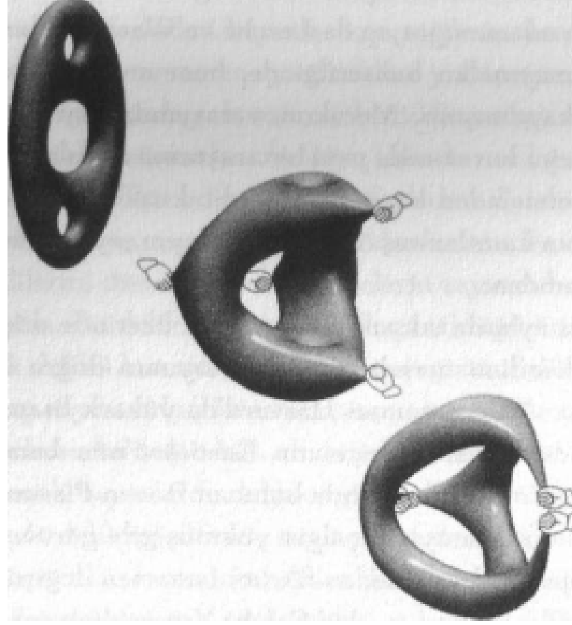
İnanılmaz gibi görünen bu olasılığın aslında nasıl gerçekleşebileceğine dair bir fikir edinmek için, fazladan Calabi-Yau boyutlarındaki delik sayısının, sicim hareketlerinin bu deliklerin içinde kendilerini düzenleyecekleri ailelerin sayısını belirlediğini hatırlayalım. Bu delikler, Şekil 9.1'de görüldüğü üzere bir simitte ve çok delikli kuzenlerinde görebileceğimiz deliklere benzer. Bir kitap sayfasında göstermek zorunda olduğumuz ikiboyutlu şeklin kusurlarından biri, altı boyutlu bir Calabi-Yau uzayının çok çeşitli boyutlarda deliklerinin olabileceğini göstermemesidir. Böyle delikleri zihinde canlandırmak daha zor olsa da, net bir matematikle betimlenebilirler. Kilit olgulardan biri, sicim titreşimlerinden doğan parçacık ailesi sayısının, her bir boyuttaki deliklerin sayısına değd de, yalnızca toplam delik sayısına duyarlı olmasıdır (örneğin IX. Bölüm'deki tartışmamızda, farklı delik tipleri arasında herhangi bir

ayrıma gitmekle uğraşmamamızın sebebi de budur). O halde, çeşitli boyutlarındaki delik sayıları farklı olan, fakat toplam delik sayıları aynı olan iki Calabi-Yau uzayı düşünelim. Boyutların her birindeki delik sayısı aynı olmadığından, bu iki Calabi-Yau farklı şekillere sahip olacaktır. Fakat ikisinde de toplam delik sayısı aynı olduğundan, ikisi de *aynı sayıda aileye* sahip birer evrene yol açacaktır. Elbette bu yalnızca tek bir fiziksel özelliktir. *Bütün* fiziksel özellikler üzerinde anlaşmak çok daha kısıtlayıcı bir koşuldur, fakat bu en azından Dixon-Lerche-Vafa-Warner varsayımının doğru olabileceğine dair bir izlenim vermektedir.

1987 sonbaharında doktora sonrası araştırmacı olarak Harvard Üniversitesi fizik bölümüne girdim, odam Vafa'nın odasının bulunduğu koridorun sonundaydı. Tez araştırmam sicim kuramındaki kıvrılmış Calabi-Yau boyutlarının fiziksel ve matematiksel özelliklerine odaklandığından, Vafa bu alandaki çalışmaları hakkında beni yakından bilgilendiriyordu. 1988 sonbaharında odama uğrayıp da Lerche ve Warner'le birlikte ulaştıkları varsayımdan bahsettiğinde, hem meraklanmış hem de kuşkuya kapılmıştım. Merakım, varsayımlarının doğru olması halinde sicim kuramında yeni bir araştırma alanının açılabileceğini fark etmemden kaynaklanıyordu; kuşkumsa tahminler ile, bir kuramın kanıtlanmış özelliklerinin aynı şeyler olmadığını biliyor olmamdan.

Sonraki aylarda sık sık bu varsayım üzerinde düşündüm ve doğrusu kendimi neredeyse bu varsayımın doğru olmadığına ikna ettim. Ama, o zaman Harvard'da yüksek lisans öğrencisi olan, şimdi de hem Weizmann Enstitüsünün hem de Duke Üniversitesinin kadrolarında bulunan Ronen Plesser'la birlikte üstlendiğimiz, konuyla hiç ilgisi yokmuş gibi görünen bir araştırma projesi, çok geçmeden fikrimi tamamen değiştirmeme yol açacaktı. Plesser ve ben, bir Calabi-Yau şekliyle işe başlayıp o şekli, o zamana dek bdinmeyen Calabi-Yau şekilleri ortaya çıkaracak biçimde matematiksel olarak manipüle etme yöntemleri geliştirmekle ilgilenmeye başlamıştık. Özellikle de 1980'lerin ortalarında Dixon, Chicago Üniversitesinden Jeffrey Harvey, Vafa ve Witten'in geliştirdiği ve *orbifolding* olarak bilinen teknikten etkilenmiştik. Kabaca söylenecek olursa orbifolding,

başlangıç noktası olarak alınan bir Calabi-Yau şeklindeki farklı noktaların, yeni bir Calabi-Yau şeklinin ortaya çıkmasını sağlayan matematiksel kurallara göre birleştirildiği bir süreçtir. Bu süreç Şekil 10.4'te şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 10.4'te gösterilen işlemlerin altında yatan matematik çok zordur, bu yüzden de sicim kuramcıları bu süreci yalnızca en basit şekil için -Şekil 9.1'de gösterilen simit şekillerinin çok boyutlu versiyonları- geçerli olduğu kadarıyla kapsamlı biçimde incelemiştir. Fakat Plesser ve ben, o zaman Princeton Üniversitesi'nde çalışan Doron Gepner'in bazı yeni ve güzel fikirlerinin, orbifolding tekniğinin, örneğin Şekil 8.9'da gösterilenler gibi bütün Calabi-Yau şekillerine uygulanmasını sağlayabilecek güçlü bir kuramsal çerçeve sunduğunu fark etmiştik.



Şekil 10.4 Orbifolding, bir Calabi-Yau şeklinden yola çıkılıp o şeklin üzerindeki çeşidi noktaların birleştirilip yeni bir Calabi-Yau şeklinin elde edilmesi sürecidir.

Bu fikir üzerinde birkaç ay boyuncayoğun bir biçimde çalıştıktan sonra şaşırtıcı bir şey fark ettik. Belli nokta gruplarını tam gerektiği gibi birleştirirsek, elde ettiğimiz Calabi-Yau şekli, ilk Calabi-Yau şeklinden şaşırtıcı bir farklılık sergiliyordu: Yeni Calabi-Yau şeklinde boyutlarının sayısı *tek* sayılı olan deliklerin sayısı, ilk Calabi-Yau şeklinde boyutlarının sayısı *çift* sayılı olan delik sayısına eşit

oluyordu, aynı şey tersi için de geçerliydi. Bu durum -çift sayılı/tek sayılı yer değişimi, Calabi-Yau,'ların şekillerinin ve temel geometrik yapılarının birbirinden hayli farklı olduğu anlamına gelse de- her birindeki toplam delik sayısının -dolayısıyla da parçacık ailesi sayısının- *ajm* olduğu anlamına geliyordu."

Plesser ve ben, Dixon-Lerche-Vafa-Warner öngörüsüyle görünüşte ortak bir nokta yakalamış olmaktan duyduğumuz heyecanla, en temel soruya geçtik: "Birbirinden farklı iki Calabi-Yau uzayının, parçacık ailelerinin sayısı dışındaki diğer fiziksel özellikleri de birbiriyle uyuşuyor mu? Oxford'daki tez danışmanım Graham Ross'un ve Vafa'nın bize değerli fikirler verdiği ve teşvik ettiği birkaç ay daha, ayrıntılı ve çok ağır matematiksel analizler yaptık ve Plesser ve ben cevabın kesinlikle evet olduğunu söyleyebilecek hale geldik. Tek sayılı/çift sayılı yer değişimi ile ilgili matematiksel gerekçeler yüzünden, Plesser ve ben fiziksel olarak birbirine eşdeğer, takat geometrik olarak birbirinden farklı Calabi-Yau uzaylarını betimlemek için *ayna katlanmalar* terimini geliştirdik." Bir Calabi-Yau ayna çiftindeki tek tek uzaylar -gündelik kullanımdaki anlamıyla- birbirlerinin ayna görüntüsü değildir. Fakat her ne kadar farklı geometrik özelliklere sahip olsalar da, sicim kuramındaki fazladan boyutlar için kullanıldıklarında tamamen aynı fiziksel evrene yol açarlar.

Bu sonuca varmamızdan sonraki haftalar, son derece gergin zamanlardı. Plesser ve ben, sicim fiziğiyle ilgili yeni ve önemli bir bilgiyi açıklamayı geciktirdiğimizi biliyorduk. Fizik ile geometri arasındaki, ilk olarak Einstein'ın saptadığı sıkı birlikteliği sicim kuramının esaslı bir biçimde değiştirdiğini göstermiştik: Genel görelilikte farklı fiziksel özellikler anlamına gelecek olan birbirlerinden çok farklı geometrik şekiller, sicim kuramında aynı fiziğe yol açıyordu. Peki ya bir hata yapmış sak? Ya bu şekillerin fiziksel özellikleri arasında, bizim gözden kaçırdığımız, kolayca ayırt edilemeyen farklar varsa? Örneğin elde ettiğimiz sonuçları Yau'ya gösterdiğimizde, kibarca fakat kesin olarak mutlaka bir hata yapmış olduğumuzu iddia etmiş, bulduğumuz sonuçların, matematiksel bir bakış açısına göre, doğru olamayacak kadar acayip olduğunu

söylemişti. Onun bu değerlendirmesi bizi durup düşünmeye yöneltti. Fazla ilgi çekmeyecek, çok önemli olmayan bir iddiada yanılmak başka şeydi. Oysa bizim bulduğumuz sonuç, yeni bir yönde beklenmedik bir adımdı ve kuşkusuz güçlü bir karşılık bulacaktı. Yanlışsa eğer, herkes duyacaktı.

Sonunda, elde ettiğimiz sonucu defalarca kontrol ettikten sonra güvenimiz arttı ve çalışmamızı yayımlanması için gönderdik. Birkaç gün sonra, Elarvard'daki odamda otururken telefon çaldı. Arayan Teksas Üniversitesi'nden Philip Candelas'tı. Candelas hemen, ayakta olup olmadığımı sordu. Oturuyorum, dedim. O zaman kendisi ve öğrencileri Monika Lynker ile Roll Schimmrigk'in beni sandalyemden düşürecek bir şey bulduklarını söyledi. Bilgisayarla oluşturdukları büyük bir Calabi-Yau uzayları örnek kümesini dikkatle incelemişler, hemen hemen hepsinin çiftler halinde olduğunu, bu uzay çiftlerinin tek sayılı ve çift sayılı deliklerin sayıları arasındaki yer değişimiyle birbirinden farklılaştığını görmüşlerdi. Ona hâlâ oturduğumu, Plesser ile benim de aynı sonuca vardığımızı söyledim. Candelas'ın çalışması ile bizim yaptığımız çalışmanın birbirlerini tamamladıkları anlaşıldı. Bir ayna çiftinde ortaya çıkan fiziğin tamamen aynı olduğunu göstererek biz bir adım daha ileri gitmiştik, Candelas ve öğrencileriyse anlamlı olacak kadar büyük bir Calabi-Yau şekilleri kümesinin ayna çiftlere ayrıldığını göstermişti. Bu iki çalışmayla, sicim kuramının *ayna simetrisini* keşfetmiş olduk.

Ayna Simetrisinin Fiziği ve Matematiği

Einstein'ın uzayın geometrisi ile gözlenen fizik arasında kurduğu katı ve alışılmadık ilişkinin yumuşaması, sicim kuramına özgü çarpıcı paradigma kaymalarından biridir. Fakat bu gelişmeler, felsefi bakış açısının değişmesinden daha fazlasını beraberinde getirir. Özellikle ayna simetrisi hem sicim kuramı fiziğinin hem de Calabi-Yau uzaylarının matematiğinin anlaşılmasını sağlayan güçlü bir araç ortaya koyar.

Cebirsel geometri denilen alanda çalışan matematikçiler, sicim kuramının keşfedilmesinden çok daha öncesinden beri Calabi-Yau

uzaylarını tamamen matematiksel açıdan incelemekteydi. Gelecekte fiziksel bir uygulama olabileceğine dair ortada en ufak bir işaret yokken, onlar bu geometrik uzayların birçok özelliğini ayrıntılı olarak ortaya çıkarmıştı. Gelgeldim Calabi-Yau uzaylarının bazı yönlerini tam olarak açıklığa kavuşturmanın matematikçiler için zor, aslında imkânsız olduğu anlaşılmıştı. Fakat sicim kuramında ayna simetrisinin keşfi bu durumu değiştirdi. Ayna simetrisi esasen, önceden aralarında hiçbir ilişki olmadığı düşünülen belirli Calabi-Yau uzayı çiftlerinin, sicim kuramı sayesinde artık yakından bağlantılı olduğunu gösterir. Eğer bu uzayların birinden biri fazladan kıvrılmış boyutlar için seçilmiş olan uzaysa, doğuracakları ortak fiziksel evren sayesinde ilişkilidirler. Önceden bilinmeyen bu karşılıklı ilişki, konunun özüne inebilen yeni bir fiziksel ve matematiksel araç ortaya koymuştur.

Örneğin, fazladan boyutlar için seçilmiş olası bir Calabi-Yau şekliyle ilişkili fiziksel özellikleri -parçacık kütleleri ve kuvvet yükleri- hesaplamakta olduğunuzu düşünün. Elde ettiğiniz ayrıntılı sonuçların deneylere uymasıyla özellikle ilgilenmezsiniz, çünkü daha önce de gördüğümüz gibi birçok kuramsal ve teknolojik engel yüzünden bugün bunu gerçekleştirmek çok zor. Onun yerine, belirli bir Calabi-Yau uzayı seçilmiş *olsaydı,* dünyanın nasıl *görüneceği* sorusuyla ilgili bir düşünce deneyi yapıyorsunuz. Bir süre her şey yolunda gidiyor, ama sonra tam çalışmanızın ortasında karşınıza altından kalkılamaz zorlukta bir matematiksel hesap çıkıyor. Hiç kimse, dünyanın en büyük matematik uzmanları bile ne yapılması gerektiğini bilemiyor. Tıkandınız, çıkmazdasınız. Ama sonra, bu Calabi-Yau'nun bir ayna eşi olduğunu fark ediyorsunuz. Ayna çiftinin iki üyesiyle de bağlantılı olarak ortaya çıkan sicim fizikleri aynı olduğundan, hesaplarınızı iki şekilden istediğiniz birini kullanarak yapabileceğinizi görüyorsunuz. Böylece, ilk Calabi-Yau şekli üzerindeki zor hesabı, ayna ikizi üzerinde yeniden ifade ediyorsunuz; iki hesabın da sonucunun -fiziğin- aynı olacağını biliyorsunuz. İlk bakışta, hesabınızın yeniden ifade edilmiş halinin ilki kadar zor olacağını düşünebilirsiniz. Ama burada hoş ve önemli bir sürprizle karşılaşıyorsunuz: Sonuç aynı olacaksa da hesabın ayrıntılarının çok farklı olduğunu, hatta bazı durumlarda, en başta sizi korkunç derecede zorlayan o hesabın,

ayna Calabi-Yau uzayı üzerinde son derece kolaylaştığını keşfediyorsunuz. Bunun neden böyle olduğuna dair basit bir açıklama yoktur, ama -en azından bazı hesaplarda- kesinlikle böyle olur, hatta zorluk derecesinde çok ciddi bir azalma olabilir. Bunun anlamı açıktır gayet tabi: Artık çıkmazda değilsiniz.

Sizden kenarları 15 metre, yüksekliği 3 metre olan dev bir kutuya gelişigüzel doldurulmuş portakalların sayısını tam olarak saymanız istendiğini düşünün. Tek tek saymaya başlıyorsunuz, ama çok geçmeden anlıyorsunuz ki bu iş çok zor ve yorucu. Fakat şansınıza portakal kutusu teslim edildiği sırada orada bulunan bir arkadaşınız geliyor. Portakalların küçük paketler halinde olduğunu (bu arada, bu paketlerden biri de elinde), üst üste yerleştirildiklerinde uzunluğu 20 paket, genişliği 20 paket, yüksekliği 20 paket büyüklüğünde bir yığın oluştuğunu söylüyor. Hemen 8000 paket portakal geldiğini hesaplıyorsunuz, artık yapmanız gereken tek şey her pakette kaç portakal olduğunu bulmak. Arkadaşınızın elindeki paketi alıp portakalla doldurarak bunu kolayca hallediyorsunuz, yani o tüm portakalları sayma işini hemen hemen hiç çaba sarf etmeden hallediyorsunuz. Aslında, hesabı gayet akıllıca yeniden düzenleyerek sayma işini çok kolaylaştırmış oluyorsunuz.

Sicim kuramındaki birçok hesap için de benzer bir durum söz konusudur. Bir Calabi-Yau uzayı açısından, bir hesap çok sayıda ve çok zor matematiksel aşama gerektirebilir. Fakat hesabı ayna ikizine aktararak daha etkin bir biçimde yeniden ifade etmiş olursunuz ve nispeten daha kolay sonuçlandırılmasını sağlarsınız. Bu noktaya Plesser ve ben dikkat çekmiştik. Candelas'ın Teksas Üniversitesinden Xeniade la Ossa ve Linda Parkes'la ve Maryland Üniversitesi'nden Paul Green'le birlikte yaptığı çalışmalarda da bu nokta etkileyici bir biçimde uygulamaya kondu. Bu çalışmalar, neredeyse hayal bile edilemeyecek kadar zor hesapların ayna perspektifi kullanılarak birkaç sayfa cebir işlemi ve bir masaüstü bilgisayarla halledilebileceğini gösteriyordu.

Bu gelişme özellikle matematikçiler için son derece heyecan vericiydi, çünkü bu hesapların bazıları tam da yıllardır tıkanıp

kaldıkları hesaplardı. Sicim kuramı çözümü onlardan önce bulmuştu, en azından fizikçiler öyle olduğunu iddia ediyordu.

Unutmayın ki, matematikçiler ile fizikçiler arasında sağlıklı ve genelde kırıcı olmayan bir rekabet vardır. Sonradan anlaşıldı ki, Norveçli iki matematikçi -Geir Ellingsrud ve Stein Arilde Stromme- Candelas ile çalışma arkadaşlarının ayna simetrisiyle başarılı bir biçimde üstesinden geldiği birçok hesaptan biri üzerinde çalışıyordu. Kabaca söyleyecek olursak, problem belirli bir Calabi-Yau uzayının içine "sığdırılabilecek" küre sayısının hesaplanmasıyla ilgiliydi; biraz önce yaptığımız, dev bir kutudaki portakalları sayma benzetmesinde olduğu gibi. 1991'de Berkeley'de düzenlenen, fizikçilerin ve matematikçilerin katıldığı bir toplantıda, Candelas kendi grubunun sicim kuramını ve ayna simetrisini kullanarak vardığı sonucu açıkladı: 317.206.375. Ellingsrud ve Stromme de yaptıkları çok zor matematiksel hesabın sonucunu açıkladı: 2.682.549.425. Matematikçiler ve fizikçiler günlerce tartıştı: Kim haklıydı. Bu soru, sicim kuramının niceliksel güvenilirliğini sınamaya yönelik gerçek bir turnusol testine döndü. Hatta bazdan -şakayla karışık- bu testin, sicim kuramının deneyle kanıtlanabilmesinden sonra olabilecek en iyi şey olduğu yorumunda bulundu. Dahası, Candelas'ın vardığı sonuçlar Ellingsrud ile Stromme'nin hesapladıklarını deri sürdükleri o bir tek sayısal sonucun çok ötesine geçiyordu. Candelas ve çalışma arkadaşları, son derece zor olan -aslına bakarsanız matematikçilerin üstünde çalışmaya hiç girişmeyeceği kadar zor- başka birçok soruyu da cevapladıklarını iddia ediyordu. Fakat sicim kuramıyla elde edilen sonuçlara güvenilebilir miydi. Toplantı, fizikçiler ile matematikçiler arasında epeyce verimli geçen bir fikir alışverişiyle son buldu, fakat uyumsuzluğu ortadan kaldıracak bir çözüm bulunamadı.

Yaklaşık bir ay sonra, Berkeley'deki toplantıya katılanlar arasında "Fizik kazandı!" başlıklı bir e-posta mesajı dolaşıyordu. Ellingsrud ile Stromme bilgisayar kodlarında bir hata bulmuşlardı, hata düzeltildiğinde bilgisayar Candelas'ın vardığı sonucu doğrulamıştı. O tarihten beri, sicim kuramının ayna simetrisinin niceliksel olarak güvenilir olup olmadığı matematiksel olarak pek çok defa sınandı; her defasında da yıldızlı pekiyi aldı. Daha dayakın bir zamanda,

fizikçilerin ayna simetrisini keşfetmesinden neredeyse on yıl sonra, matematikçiler ayna simetrisinin yapısındaki matematiksel temelleri açığa çıkarma konusunda büyük ilerleme kaydetti. Sonunda Yau ile çalışma arkadaşları Bong Lian ve Kefeng Liu, matematikçiler Maxim Kontsevich, Yuri Manin, Gang Tian, Jun Li ve Alexander Giventa1'in önemli katkılarından yararlanarak, Calabi-Yau uzaylarının içindeki küreleri saymak için kullanılan formüllerin güçlü bir matematiksel kanıtını bulup yüzlerce yıldır matematikçilerin kafasını karıştırmış problemleri çözdüler.

Bu başarının ayrıntılarından öte, bu gelişmelerin dikkat çektiği şey aslında fiziğin modern matematikte oynamaya başladığı roldür. Fizikçiler epeyce uzun bir süre boyunca, fiziksel dünyaya ilişkin modeller kurmalarını ve analiz etmelerini sağlayacak araçlar bulabilmek için matematik arşivlerini "alt üst" etti. Bugün sicim kuramının keşfiyle birlikte, fizik borcunu ödemeye, matematikçilere çözülmemiş problemleriyle ilgili yeni ve güçlü yaklaşımlar sunmaya başlıyor. Sicim kuramı sadece fizik için birleştirici bir çerçeve sunmakla kalmayıp matematikle de aynı derecede derin bir bağ kurabilir pekâlâ.

XI. Bölüm

Uzayın Dokusunu Yırtmak

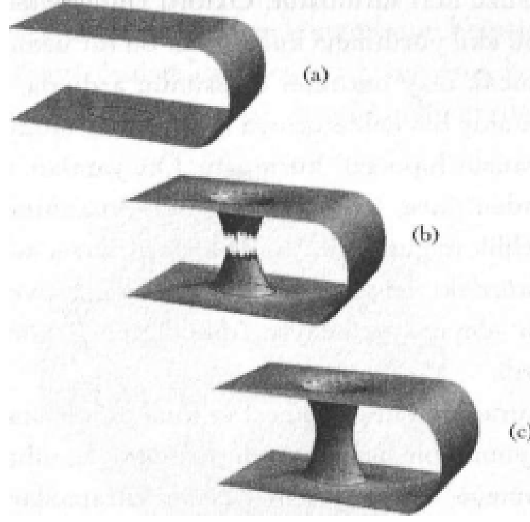
Kauçuk bir zarı hiç durmadan çekerseniz, er geç yırtılacaktır. Bu basit gerçek, yıllar içinde çok sayıda fizikçinin, aynı şeyin evreni oluşturan uzamsal doku için de geçerli olup olmadığı sorusunu sormasına neden olmuştur. Yani uzayın dokusu da yırtılabilir mi, yoksa bu kauçuk zar benzetmesini fazla ciddiye almaktan kaynaklanan hatalı bir kavrayış mıdır?

Einstein'ın genel görelilik kuramı, hayır, uzayın dokusu yırtılamaz der. Genel görelilik denklemlerinin kökleri Riemann geometrisindedir; önceki bölümde belirttiğimiz üzere bu da, uzayda birbirine yakın konumlar arasındaki mesafe dişkderin-deki çarpılmaları analiz eden bir çerçevedir. Temeldeki matematiksel biçimcdik, bu mesafe ilişkileri hakkında anlamlı bir şeyler söyleyebilmemiz için, uzayın alt katmanlarının *düzgün* olmasını gerektirir. "Düzgün" burada matematiksel bir anlamı olan teknik bir terimdir, fakat gündelik kullanımı da terimin özünü yakalar: Buruşuk olmayan, deliği olmayan, birbirine "tutturulmuş" ayrı parçalardan oluşmayan, yırtığı olmayan. Uzayın dokusu böyle düzensizlikler gösteriyor olsaydı genel görelilik denklemleri çökerdi; bu da şu veya bu biçimde bir kozmik felaketin -görünüşe bakılırsa iyi huylu evrenimizin kaçındığı feci bir sonucun- habercisi olurdu.

Fakat bu durum, hayalgücü geniş kuramcıları yıllar içinde Einstein'ın klasik kuramının ötesine geçip kuantum fiziğini de içine alan yeni bir fizik formülasyonunun uzamsal dokuda yarıklar, yırtıklar ve birleşmelerin olduğunu gösterebileceği olasılığı üzerinde düşünmekten alıkoymamıştır. Aslına bakarsanız, kuantum fiziğinin kısa mesafede şiddetli dalgalanmalar yaşandığını göstermesi, kimi fizikçileri yarıkların ve yırtıkların uzamsal dokuda sıradan birer mikro özellik olduğu yönünde tahminlerde bulunmaya götürmüştür. *Solucandeliği* kavramında *(Uzay Yolu: Deep Space Nine* hayranlarının aşina olduğu bir kavram) bu tür düşüncelerden

yararlanılmıştır. Fikir basittir: Diyelim ki, merkezi New York'taki Dünya Ticaret Merkezi kulelerinden birinin 90. katında bulunan bir şirketin icra kurulu başkanısınız. Şirketin tarihindeki saçma sapan bazı işler yüzünden, şirketinizin giderek daha da fazla temasta olmak zorunda olduğunuz bir kolu diğer kulenin 90. katına yerleşmiş. Ofislerden birini ya da diğerini taşımak pratik olmayacağından, doğal bir öneri ortaya atıyorsunuz: Bir ofisten diğerine, iki kuleyi birleştiren bir köprü yapılsın. Böylece çalışanlar aşağı inip sonra tekrar 90 kat çıkmalarına gerek kalmaksızın ofisler arasında rahatça gidip gelebilecektir.

Solucandeliklerinin de benzer bir rolü vardır: Bir solucandeliği evrenin bir bölgesiyle diğeri arasında kestirme bir yol oluşturan bir köprü ya da tüneldir, ikiboyutlu bir model kullanalım ve evrenin şeklinin, Şekil 11.1'de gösterildiği gibi olduğunu düşünelim. Eğer şirket merkezi, 11.1 (a)'da gösterilen alttaki dairenin yakınlarında bulunuyorsa, yukarıdaki dairenin yakınlarında bulunan şubeye, ancak sizi evrenin bir ucundan diğerine götürecek U-şeklindeki yolun tamamını kat ederek gidebilirsiniz. Fakat eğer uzayın dokusu yırtılabilir ve 11.1 (b)'de olduğu gibi delikler oluşabilirse, bu deliklerin de uçları "büyüyüp" 11.1 (c)'de görüldüğü gibi birleşirse, önceden uzak olan bölgeler uzamsal bir köprüyle birleşmiş olacaktır. Bu bir solucandeliği-dir. Solucandeliğinin, Dünya Ticaret Merkezindeki köprüye biraz benzediğini, fakat arada temel bir fark olduğunu unutmamalısınız: Dünya Ticaret Merkezi köprüsü *mevcut* uzayın birbölgesini -iki kule arasındaki uzayı- kat edecektir. Oysa solucandeliği, uzayda *yeni* bir bölge yaratır; çünkü Şekil 11.1 (a)'daki ıkiboyutlu eğri uzay, sadece o kadardır (ikiboyutlu benzetmemiz bağlamında). Zarın dışında kalan bölgeler, U şeklindeki bu evreni, çok boyutlu evrenimizin içindeki bir nesneymiş gibi gösteren çizimin yetersizliğidir. Solucandeliği yeni uzay yaratır ve böylece de yeni bir uzamsal alan açar.



Şekil 11.1 (a) "U şeklindeki" bir evrende, bir uçtan diğer uca gitmenin tek yolu evrenin tamamını kat etmektir, (b) Uzayın dokusu yırtılır ve bir solucandeliğinin iki ucu belirmeye başlar, (c) İki uç birleşir ve evrenin bir ucundan diğerine uzanan yeni bir köprü -bir kestirme yol- oluşur.

Evrende solucandelikleri var mı? Kimse bilmiyor. Eğer varlarsa, sadece mikro düzeyde mi oldukları, yoksa evrenin geniş bölgelerini mi kapladıkları *(Deep Space Nine da.* olduğu gibi) bilinmiyor. Uzayın dokusunun yırtılıp yırtılamayacağmı belirleyerek, solucandeliklerinin olgu mu yoksa kurgu mu olduğunu anlayabiliriz.

Kara delikler, uzayın dokusunun zorlanmasının bir başka ikna edici örneğidir. Şekil 3.7'de bir kara deliğin muazzam kütleçekimi alanının aşırı bir eğrilmeye yol açtığını, bu nedenle uzayın dokusunun, kara deliğin merkezinde delinmiş ya da sıkışmış gibi *göründüğünü* göstermiştik. Solucandeliklerinin tersine, kara deliklerin varlığını destekleyen güçlü deneysel kanıtlar vardır, bu yüzden de kara deliklerin merkezinde aslında ne olup bittiği sorusu, spekülasyon değil bilimsel bir sorudur. Genel görelilik denklemleri bu tür aşırı koşullarda yine çöker. Bazı fizikçiler, kara deliklerin merkezinde gerçekten de bir delik bulunduğunu, fakat bu kozmik "tekillikten", kara deliğin hiçbir şeyin kütle çekimsel kapanından kaçamadığı olay ufku sayesinde korunduğumuzu ileri sürmüştür. Oxford Üniversitesi nden Roger Penrose bu akıl yürütmeyi

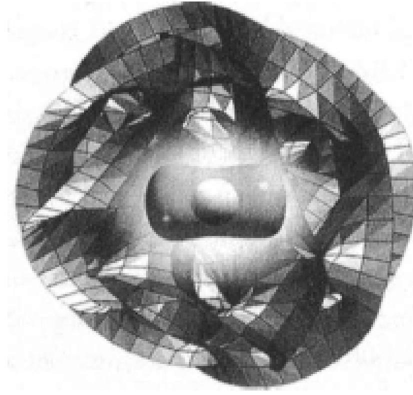
kullanarak bu tür uzamsal düzensizliklerin, ancak olay ufkunun örtüsünün ardında, bizden tamamen saklanmış bir halde ortaya çıkmalarını mümkün kılan bir "kozmik sansür hipotezi" kurmuştu. Öte yandan, sicim kuramının keşfinden önce, bazı fizikçiler eğer kuantum mekaniği ile genel görelilik uygun bir biçimde birleştirilirse, aslında uzaydaki o görünürdeki deliğin kuantum özellikleri sayesinde düzleştirildiğinin -deyim yerindeyse "dikildiğinin"- görüleceğini düşünmüşlerdi.

Sicim kuramının keşfedilmesi ve kuantum mekaniği ile kütleçekimin uyumlu bir biçimde birleştirilmesiyle, nihayet bu konuları incelemeye hazırız. Henüz sicim kuramcıları bu soruları tam anlamıyla cevaplayamadı, fakat son birkaç yıl içinde bu sorularla yakından ilişkili konular *çözümlendi.* Bu bölümde, sicim kuramının ilk defa uzayın dokusunun *yırtılabileceği* fiziksel koşullar olduğunu -belirli bakımlardan solucandelikleri ve kara deliklerden farklı olan koşullar- nasıl kesinlikle gösterdiğini tartışacağız.

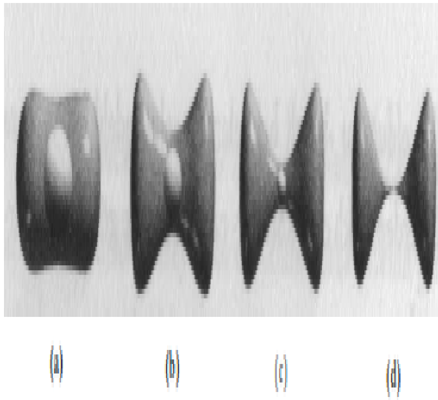
Çok Çekici Bir Olasılık

1987'de Shing-Tung Yau ile bugün Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde çalışan öğrencisi Gang Tian ilginç bir matematiksel gözlemde bulundular. İyi bilinen bir matematiksel süreci kullanarak, belirli Calabi-Yau şekillerinin yüzeylerinin yırtılması ve sonuçta ortaya çıkan deliklerin belli bir matematiksel örüntüye göre dikilmesi yoluyla, başka Calabi-Yau şekillerine dönüştürülebileceğini bulmuşlardı. Kabaca söyleyecek olursak, Şekil 11.2'de olduğu gibi, başlangıç noktası olarak aldıkları bir Calabi-Yau şeklinin içinde, belli bir tür ikiboyutlu küre -deniz topunun yüzeyi gibi- belirlemişlerdi. (Bildiğimiz bütün nesneler gibi deniz topu da üçboyutludur. Fakat burada yalnızca topun yüzeyinden bahsediyoruz; yapıldığı maddenin kalınlığını, ayrıca çevrelediği yani içindeki uzayı görmezden geliyoruz. Deniz topunun yüzeyindeki noktaların konumları, tıpkı Dünyanın yüzeyindeki noktaların konumlarını belirtirken yaptığımız gibi iki sayı -"enlem" ve "boylam"- verilerek belirlenebilir. Deniz topunun *yüzeyinin,* tıpkı önceki bölümlerde tartışmış olduğumuz Bahçe Hortumu evren gibi ıkiboyatla olmasının sebebi budur.) İkili

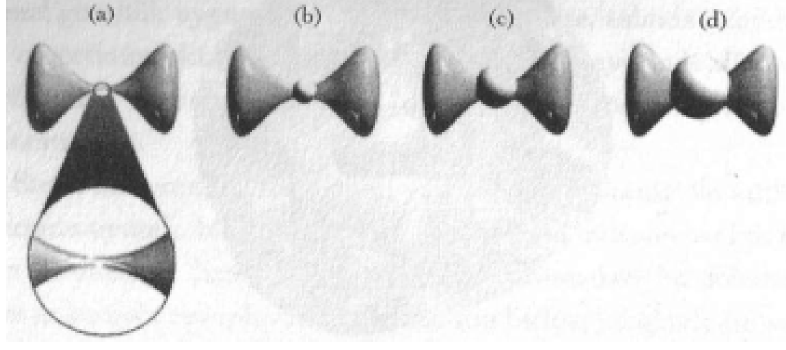
daha sonra küreyi. Şekil 11.3'te görüldüğü üzere, tek bir noktaya sıkışıncaya dek küçültmeyi düşündüler. Bu şekil ve bu bölümde daha sonra göreceğiniz şekiller, Calabi-Yau şeklinin konuyla en yakından ilgili "parçasına" odaklanılarak basitleştirilmiştir, fakat bu şekil dönüşümlerinin Şekil 11.2'deki gibi biraz daha büyük bir Calabi-Yau şekli üzerinde meydana geldiğini unutmamalısınız. Tian ve Yau, son olarak da Calabi-Yau şeklini sıkıştığı noktada yırttıklarını (Şekil 11.4 (a)), açtıklarını ve içine deniz topu benzeri başka bir şekil yapıştırdıklarını (Şekil 11.4 (b)), sonra da bu şekli büyütüp şişkin hale getirdiklerini (Şekil 11.4 (c) ve 11.4 (d)) düşündüler.



Şekil 11.2 Bir Calabi-Yau şeklinin içindeki belirgin hale getirilmiş bölgede bir küre bulunmaktadır.



Şekil 11.3 Bir Calabi-Yau şeklinin içindeki küre bir noktaya kadar küçülür ve uzayın dokusunda bir sıkışma yaratır. Bunu ve sonraki şekilleri, Calabi-Yau şeklinin bir kısmını göstererek sadeleştirdik.



Şekil 11.4 Sıkışmış bir Calabi-Yau şekli yırtılır ve bu noktada yüzeyi düzelten bir küre gelişir. Şekil 11.3'teki ilk küre "sönmüştür".

Matematikçiler bu manipülasyon dizisine sönme gelişi der. Sanki ilk deniz topu şekli "sönüp" Calabi-Yau şekli içinde yeni bir konum kazanmıştır. Yau, Tian ve diğerleri. Şekil 11.4 (d)'de olduğu gibi, belirli koşullarda, bir sönmeyle ortaya çıkan yeni Calabi-Yau şeklinin Şekil 11.3 (a)'daki ilk Calabi-Yau şeklinden *topolojik olarak farklı* olduğunu göstermiştir. Bu da, Şekil 11.3 (a)'daki ilk Calabi-Yau şeklinin bozulup Şekil 11.4 (d)'deki son Calabi-Yau şekli haline getirilmesinin, Calabi-Yau şeklinin dokusunu ara bir aşamada yırtmaktan başka hiçbir yolu olmadığını söylemenin süslü bir yoludur.

Matematiksel bir bakış açısına göre, Yau ile Tian'ın kullandığı bu süreç ilgi çekicidir, çünkü bilinen Calabi-Yau şekillerinden hareketle yeni Calabi-Yau şekilleri ortaya çıkarmanın bir yolunu göstermektedir. Fakat asıl potansiyeli fizik alanında yatmakta, çok çekici bir soru ortaya atmaktadır: Şekil 11.3 (a)'dan şekil 11.4 (d) ye kadar gösterilen sıralama, soyut matematiksel bir süreç olmasının ötesinde, doğada gerçekten de ortaya çıkabilir mi? Einstein'ın beklentilerinin tersine, acaba uzayın dokusu *yırtılabilir ve* tarif edildiği gibi *sonra da yeniden onarılabilir mi?*

Ayna Perspektifi

Yau, 1987'deki bu gözlemlerinden sonraki birkaç yıl boyunca beni zaman zaman, bu sönme geçişlerinin fiziksel bir somutluğu olması olasılığı üzerinde düşünmeye teşvik etti. Ama ben düşünmedim.

Sönme geçişleri bana, sicim kuramı fiziğine hiçbir etkisi olmayan soyut matematik gibi görünüyordu sadece. Aslına bakarsanız insan kendini, X. Bölüm'de anlatılan, dairesel boyutların asgari bir yarıçapı olduğu sonucuna vardığımız tartışmaya dayanarak, sicim kuramının Şekil 11.3'teki kürenin küçülüp sıkışmış bir nokta haline gelmesine izin vermediğini söylemekten alamayabilir. Fakat unutmayın ki, yine X. Bölüm'de belirttiğimiz üzere, bir uzamsal boyutun tamamı değil de uzayın bir parçası -bu durumda bir Calabi-Yau şeklinin küresel bir parçası- çökerse, küçük ve büyük yarıçapları tanımlayan sav doğrudan geçerli olmaz. Yine de, sönme geçişlerini hesaba katmamak için öne sürülen bu fikir dikkatle incelenmeye gelmese de, uzay dokusunun yırtılabileceği hâlâ pek olası görünmüyordu.

Ama sonra 1991'de Norveçli fizikçi Andy Lütken ile Oxford'dan yüksek lisans arkadaşım ve bugün Duke Üniversitesi'nde profesör olan Paul Aspinwall, kendilerine sonradan çok ilginç olduğu anlaşılacak bir soru sordular: Eğer evrenimizin Calabi-Yau kısmının uzamsal dokusunda uzayı yırtan bir çökme geçişi olsaydı, bu durum ayna Calabi-Yau şeklinin perspektifinden nasıl görünürdü? Bu soruyu neyin doğurduğunu anlayabilmek için, ayna çifti Calabi-Yau şekillerinin (eğer fazladan boyutlar için seçilmişlerse) birinden ya da diğerinden doğan fiziğin aynı olduğunu, fakat bir fizikçinin bu fiziği bulabilmek için kullanması gereken matematiğin karmaşıklık derecesinin iki şekil arasında büyük bir farklılık gösterebileceğini hatırlayın. Aspinwall ve Lütken Şekil 11.3 ve 11.4'te görülen matematiksel olarak karmaşık sönme geçişlerinin çok daha basit bir ayna tanımlaması olabileceği öngörüsünde bulunmuştu; ilgili fizik hakkında daha şeffafbir görüş kazandırabilecek bir tanımlama.

Lütken ile Aspinwal1'ın yürüttüğü çalışma sırasında, ayna simetrisi henüz ikilinin sorduğu soruyu cevaplamak için gereken derinlikte anlaşılmamıştı. Ancak Aspinwall ile Lütken ayna tanımlamasında, görünüşte, sönme geçişlerinin yol açacağı uzamsal yırtılmalarla ilişkili felaket anlamına gelen bir fiziksel sonuca işaret eden hiçbir şey olmadığını belirtiyorlardı. O sıralarda Plesser'in ve benim ayna çifti Calabi-Yau şekillerini bulduğumuz çalışma (X. Bölüm'e bakınız), bizi de beklenmedik şekilde sönme geçişleri üzerinde düşünmeye

götürmüştü. Şekil 10.4'te olduğu gibi çeşitli noktaları birbirine yapıştırmanın -ayna çiftler oluşturmak için biz de bu süreci kullanıyorduk- Şekil 11.3 ile 11.4'teki yırtılmalar ve sıkışmalarla aynı geometrik durumlara yol açtığı iyi bilinen bir matematiksel gerçektir. Fakat biz, fizik açısından bununla ilişkili bir felakete rastlamamıştık. Dahası Plesser ve ben, Aspiwnall ın ve Lütken'in gözlemlerinden (ayrıca daha önceki bir tarihte Graham Ross'la birlikte yazdıkları bir makaleden) esinlenerek, sıkışmayı matematiksel olarak iki farklı biçimde onarabileceğimizi fark etmiştik. Bu yollardan biri Şekil 11.3 (a)'daki Calabi-Yau şekline, diğeriyse Şekil 11.4 (d)'deki Calabi-Yau şekline yol açıyordu. Bu da bize Şekil 11.3 (a)'dan 11.4 (d) ye kadar yaşanan değişimin aslında doğada gerçekleşebilecek bir şey olduğunu düşündürdü.

1991'in sonlarında, artık en az birkaç sicim kuramcısı, uzayın dokusunun *yırtılabileceği yönünde* bir düşünceye sahipti. Fakat hiç kimse, bu şaşırtıcı olasılığın kesin olarak kanıtlanmasını ya da çürütülmesini sağlayacak teknik olanaklara sahip değildi.

Yavaş Yavaş İlerlemek

Plesser ve ben 1992 yılı boyunca zaman zaman, uzayın dokusunda, uzayı yırtan sönme geçişleri olabileceğini göstermeye çalıştık. Hesaplarımız ikinci dereceden bir iki destekleyici kanıt ortaya çıkarıyordu, fakat kesin bir kanıt bulamıyorduk, ilkbaharda bir gün, Plesser bir konuşma yapmak üzere Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü'ne gitti. Witten'le yaptıkları özel görüşme sırasında da ona uzayın yırtılmasına yol açan sönme geçişlerinin matematiğini, sicim kuramının fiziği içerisinde gerçekleştirme yolundaki son girişimlerimizden bahsetti. Fikirlerimizi özetledikten sonra, Witten'in cevabını bekledi. Witten kara tahtanın başından uzaklaşıp ofisinin penceresinden dışarıya baktı. Kısa bir suskunluktan sonra, Plesser'a dönüp eğer fikirlerimiz iyi sonuç verirse, "bunun çok etkileyici bir şey olacağını" söyledi. Onun bu sözleri çabalarımızı yeniden alevlendirdi. Fakat bir süre sonra ilerlememiz durunca, ikimiz de sicim kuramıyla ilgili başka projeler üzerinde çalışmaya başladık.

Yine de ben kendimi uzayın yırtılmasına yol açan sönme geçişleri olasılığı üzerinde kafa yorarken buldum. Aylar geçtikçe, bu geçişlerin sicim kuramının ayrılmaz bir parçası olması gerekliğinden giderek daha da emin oluyordum. Plesser ile birlikte yaptığımız ilk hesaplar ve Duke Üniversitesi'nden matematikçi David Morrison'la yaptığımız öğretici tartışmalar sonucunda öyle görünüyordu ki, ayna simetrisinin doğal olarak desteklediği tek sonuç buydu. Aslına bakarsanız, Morrison'la birlikte Duke Üniversitesi'ne yaptığımız bir ziyaret sırasında, o sıralarda orada bulunan Oklahoma Eyalet Üniversitesinden Sheldon Katz'ın bazı yararlı gözlemlerinden de hareketle, sicim kuramı çerçevesinde sönme geçişlerinin gerçekleşebileceğini kanıtlayan bir stratejiyi ana hatlarıyla belirlemiştik. Fakat gerekli hesapları yapmaya koyulduğumuzda, olağanüstü derecede yoğun olduklarını gördük. Sonuçlandırılmaları, dünyanın en hızlı bilgisayarında bile yüzyılı aşkın bir süre alacaktı. İlerleme kaydetmiştik, fakat belli ki hesaplama yöntemimizin etkinliğini artıracak yeni bir fikre ihtiyacımız vardı. Essen Üniversitesinden matematikçi Victor Batyrev, 1992 ilkbahar ve yaz aylarında yayımladığı makalelerle, hiç bilmeden böyle bir fikir ortaya koydu.

Özellikle de Candelas ve çalışma arkadaşlarının, X. Bölüm un sonunda anlattığımız küre sayma probleminde ayna simetrisini kullanarak başarılı olmalarının sonrasında, Batyrev ayna simetrisine büyük bir ilgi duymuştu. Fakat Batyrev konuya bir matematikçinin bakış açısıyla yaklaştığından, Plesser ve benim ayna çifti Calabi-Yau uzayları bulmak için başvurduğumuz yöntemlerden huzursuz olmuştu. Her ne kadar bizim yaklaşımımız, sicim kuramcılarmınkine benzer araçlardan yararlanıyorsa da, Batyrev daha sonra bana makalemizin kendisine "kara büyü" gibi geldiğini söylemişti. Onun bu sözleri fizik disiplini ile matematik disiplini arasındaki büyük kültürel bölünmeyi yansıtıyor; sicim kuramı bu disiplinlerin sınırlarını bulanıklaştırdığından, her iki alanın dilleri, yöntemleri, tarzları arasındaki büyük farklılıklar giderek belirginlik kazanmıştır. Fizikçiler daha çok yenilikçi bestecilere benzer, çözüm arayışı içinde geleneksel kuralları aşmayı, kabul edilebilirlik sınırlarını silmeyi göze alırlar. Matematikçiler ise klasik bestecilere benzer, genelde daha

sıkı bir çerçeve içinde çalışırlar; önceki bütün adımlar gereken titizlikle uygulanmadan bir sonraki adımı atmak istemezler. Her iki yaklaşımın da hem avantajları hem dezavantajları vardır; ikisi de yaratıcı keşifler için benzersiz birer çıkış noktasıdır. Modern müzikte ve klasik müzikte olduğu gibi, bir yaklaşımın doğru diğerinin yanlış olması söz konusu değildir; seçilen yöntemler, büyük ölçüde zevk ve eğitim meselesidir.

Batyrev, ayna katlanmaların oluşumunu daha bildik bir matematiksel çerçeve içinde gerçekleştirmeye çalıştı ve bunu başardı. Tayvanlı matematikçi Shi-Shyr Roan'ın daha önce yaptığı çalışmalardan esinlenerek, birbirinin ayna imgesi olan Calabi-Yau uzayı çiftleri yaratmaya yönelik sistematik bir matematiksel süreç keşfetmişti. Ortaya koyduğu yapı, Plesser ve benim değerlendirdiğimiz örneklerde bulduğumuz süreçten ibaretti, fakat matematikçilerin daha aşina olduğu bir tarzda dile getirilmiş daha genel bir çerçeve ortaya koyuyordu.

Batyrev'in yayımladığı makalelerde matematiğin, fizikçilerin çoğunun daha önce hiç karşılaşmamış olduğu alanlarına başvurması işin diğer yönüydü. Örneğin ben, savlarının özünü yakalayabiliyordum, fakat hayati önem taşıyan ayrıntıların birçoğunu anlamakta cidden zorlanıyordum. Fakat bir şey gayet açıktı: Çalışmasında kullandığı yöntem, eğer gereği gibi anlaşılıp uygulanırsa, uzayın yırtılmasına yol açan sönme geçişleri konusunda yeni bir atılım hattı açılmasını mümkün kılabilirdi pekâlâ.

Bu gelişmelerin verdiği enerjiyle yaz sonunda, tam ve kesintisiz bir yoğunlaşmayla sönme problemine geri dönmeye karar verdim. Morrison bir yıllığına Duke'ten ayrılıp İleri Araştırmalar Enstitüsü'ne gidecekti. Aspinwal1'un da doktora sonrası araştırmacı sıfatıyla orada olacağını biliyordum. Birkaç telefon görüşmesi ve e-postanın ardından 1992 sonbaharını Enstitü'de geçirmek üzere Cornell Üniversitesi'nden izin aldım.

Bir Strateji Doğuyor

İnsan, uzun saatler boyunca yoğun bir biçimde çalışmasına odaklanmak istiyorsa eğer, İleri Araştırmalar Enstitüsünden daha ideal biryer bulamaz. 1930'da kurulan Enstitü, Princeton Üniversitesi kampüsünden birkaç kilometre ötedeki bir ormanın kıyısında uzanıp giden kırın ortasındadır. Enstitü'de çalışırken dikkatinizin dağılamayacağı söylenir, çünkü dikkatinizi dağıtacak hiçbir şey yoktur.

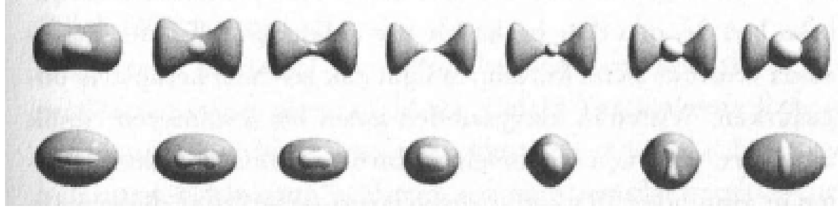
Einstein 1933'te Almanya'dan ayrılmasının ardından Enstitüye katılmış ve hayatı boyunca da burada kalmıştı. Onu Enstitü nün sessiz, sakin, neredeyse münzevilere yaraşır ortamında, birleşik alan kuramı üzerinde düşünürken hayal etmek pek zor değil. Derin düşünce mirası atmosfere öyle bir nüfuz etmiştir ki, kendi çalışmanızın o anki durumuna göre bu heyecan verici de olabilir, boğucu da.

Enstitüye gelmemden kısa bir süre sonra, Aspinwall ile birlikte Nassau caddesinde (Princeton kasabasının en işlek caddesi) akşam yemeğini nerede yiyeceğimizi kararlaştırmaya çalışıyorduk. Bu hiç de kolay bir iş değildi, çünkü ben ne kadar koyu bir vejetaryensem, Paul de o kadar koyu bir etseverdir. Bir yandan yürüyüp bir yandan hayatlarımızdaki gelişmeler üzerine birbirimize bilgi verirken Paul, üzerinde çalışacak yeni bir şeylerle ilgilenip ilgilenmediğimi sordu. İlgilendiğimi söyleyip eğer evren gerçekten de sicim kuramıyla betimleniyorsa, uzayı yırtan sönme geçişlerinin yaşanabileceğini kanıtlamanın önemiyle ilgili düşüncelerimi, ayrıca izlediğim stratejiyi ana hatla-rıyla anlattım. Batyrev'in çalışmasının kayıp parçalan bulmamızı sağlayacağı yolundaki yeni umudumdan da söz ettim. Paul un zaten çoktan ikna olduğunu dolayısıyla da bu ihtimalin onu gerçekten heyecanlandıracağını düşünmüştüm. Ama heyecanlanmadı. Geri dönüp baktığımda, onun bu suskunluğunun aramızdaki iyi niyetli, uzun yıllara dayanan entelektüel mücadeleden kaynaklandığını görüyorum; birbirimizin fikirlerine karşı şeytanın avukatlığını yapardık. Birkaç gün sonra fikir değiştirdi ve birlikte tüm dikkatimizi sönmelere verdik.

O tarihte Morrison da Enstitüye gelmişti; bir strateji belirlemek için Enstitünün çay salonunda buluştuk. Temel amacımızın, Şekil 11.3 (a)'dan Şekil 11.4 (d) ye doğru gerçekleşen değişimin, evrenimizde gerçekten ortaya çıkıp çıkmayacağını belirlemek olduğunda anlaşmıştık. Fakat konunun üzerine doğru dan gitmek ürkütücüydü, çünkü bu değişimi betimleyen denklemler son derece zordu, özellikle de uzamsal yırtılmalar olduğunda. Onun yerine, ayna betimlemesini kullanarak soruyu başka türlü sormayı seçtik, böylece ilgili denklemlerin üstesinden gelmenin daha kolay olacağını düşünüyorduk. Bu Şekil 11.5'te şematik olarak gösteriliyor: Üst sırada Şekil 11.3 (a)'dan 11.4 (d) ye doğru ilk değişimi görüyorsunuz, alt sırada ise aynı değişim ayna Calabi-Yau şekillerinin perspektifinden görülüyor. Bazılarımızın çoktan fark ettiği üzere, ayna şekilleri kullanarak soruyu başka türlü sorduğumuzda, sicim fiziği mükemmel bir uyumluluk gösteriyor ve hiçbir felaketle karşılaşılmıyor gibi görünüyordu. Gördüğünüz gibi. Şekil 11.5'te alt sırada bir sıkışmaya da yırtılma yok gibi görünmektedir. Fakat bu gözlemin bizim açımızdan doğurduğu asıl soru şuydu: Ayna simetrisini, uygulama sınırlarının ötesinde zorluyor olabilir miydik acaba? Şekil 11.5'in sol kısmında yer alan, hem yukarıdaki hem de aşağıdaki Calabi-Yau şekilleri aynı fiziğe yol açsalar da. Şekil 11.5'in sağına doğru gerçekleşen değişimin her adımında -ortada mutlaka sıkışma-yırtılma-onarım aşamaları gerçekleşecektir- orijinal perspektifin ve ayna perspektifinin fiziksel özellikleri gerçekten aynı mıdır?

Güçlü ayna ilişkilerinin. Şekil 11.5'in üst kısmındaki Calabi-Yau şeklinde yırtılmaya yol açan dizi için geçerli olduğunu düşünmemizi sağlayacak sağlam gerekçelerimiz olsa da. Şekil 11,5'te yukarıda ve aşağıda yer alan Calabi-Yau şekillerinin yırtılma gerçekleştikten sonra da ayna çiftler olmayı sürdürüp sürdürmeyeceğini kimsenin bilmediğini fark ettik. Bu kritik bir soruydu, çünkü eğer ayna çiftlerse, ayna perspektifte bir felaketin olmaması orijinalde de bir felaket olmadığı anlamına gelecekti, böylece biz de sicim kuramında evrenin yırtılabileceğini göstermiş olacaktık. Bu sorunun bir hesaplamaya indirgenebileceğini gördük: Üstteki Calabi-Yau şekli için (Şekil 11.5'teki, diyelim üstte en sağda yer alan Calabi-Yau şeklini

kullanarak) ve bu şeklin ayna imgesi olduğu varsayılan şekil için (Şekil 11.5'teki altta en sağda yer alan Calabi-Yau şekli) evrenin yırtılmadan sonraki özelliklerini belirleyin, sonra da aynı olup olmadıklarına bakın.



Şekil 11.5 Uzayda yırtılmaya yol açan bir sönme geçişi (üst sıra) ile onun ayna imgesi olduğu varsayılan yeniden ifadesi (alt sıra)

Aspinwall, Morrison ve ben, 1992 sonbaharında işte bu hesaplamaya adadık kendimizi.

Einstein'ın Dolaştığı Yerlerde Sabahlarken

Edward Witten'in keskin zekâsı, iğneleyici biryönü de olabilen, neredeyse ironik ama nazik bir tavrın ardında gizlidir. Einstein'dan sonra dünyanın yaşayan en büyük fizikçisi olarak görülür. Daha ileri gidip onu tüm zamanların en büyük fizikçisi olarak tanımlayanlar da vardır. En zor ve en yeni fizik problemlerine doymaz bir iştahla saldırır. Sicim kuramıyla ilgili araştırmaların yönünün belirlenmesinde çok büyük bir ağırlığı vardır.

Witten'in üretkenliğinin kapsamı ve derinliği efsanevi boyutlardadır. Kendisi de Enstitü'de fizikçi olan karısı Chiara Nappi, bir keresinde onu şöyle anlatmıştır: Witten mutfak masasında oturmuş zihnindeki sicim kuramına dair bilgileri yokluyor, ancak arada bir hemen açıklayamadığı bir iki ayrıntıyı doğrulamak üzere eline kâğıt kalem alıyor. Bir yaz Witten'in odasının hemen yanındaki odada doktora sonrası araştırmacı olarak çalışan biri de, ona dair başka bir şey anlatmıştır: Kendisi masasında oturmuş sicim kuramıyla ilgili çok zor bazı hesaplarla boğuşurken, Witten'in klavyesinden gelen hiç kesilmeyen ritmik tıkırtıları, çığır açıcı makalelerin birbiri ardına

doğrudan Witten'in zihninden bilgisayar dosyalarına aktarılışını dinlemenin ne kadar huzursuz edici olduğundan bahsetmiştir.

Enstitüye varmamdan bir iki hafta sonra, Witten'le Enstitü'nün bahçesinde sohbet ediyorduk; bana araştırma planlarımı sordu. Uzayda yırtılmaya yol açan sönmelerden ve izlemeyi planladığımız stratejiden bahsettim. Bu fikirleri duyduğunda gözleri parladı; fakat hesapların korkunç derecede zor olacağı kanısında olduğunu söyleyerek beni uyardı. Ayrıca anlattığım stratejideki olası bir zayıf halkaya, birkaç yıl önce Vafa ve Warner'la birlikte yaptığım bazı çalışmalarla ilgili bir noktaya dikkatimi çekti. Sonradan bu noktanın, sönmeleri anlamaya yönelik yaklaşımımızla doğrudan ilgili olmadığı anlaşıldı. Fakat o nokta, Witten'in ileride konuyla doğrudan ilgili ve tamamlayıcı olduğu ortaya çıkacak başka bazı noktalar hakkında düşünmeye başlamasını sağlamıştı.

Aspinwall, Morrison ve ben yaptığımız hesapları iki parçaya bölmeye karar verdik. İlk başta, önce Şekil 11.5'te üst sırada yer alan son Calabi-Yau şekli için geçerli olan fiziği çıkarmak, sonra da aynı şeyi Şekil 11.5'te alt sırada yer alan son Calabi-Yau şekli için yapmak doğal bir bölme gibi görünüyordu. Eğer üstteki Calabi-Yau şekli yırtıldığında ayna ilişkisi dağıtmıyorsa, her iki sıradaki son Calabi-Yau şeklinin aynı fiziğe yol açması gerekirdi, tıpkı ilk iki Calabi-Yau şekli gibi. (Problemi bu şekilde ifade etmek, üstteki Calabi-Yau şekli tam yırtılırken yapılması gereken o çok zor hesaplardan kaçınmamızı sağlıyordu.) Ama üst sıradaki son Calabi-Yau şekliyle ilgili fiziği hesaplamanın hayli basit olduğu anlaşıldı. Planladığımız stratejiyi uygulamadaki asıl zorluk, önce Şekil 11.5'te alt sıradayer alan son Calabi-Yau şeklinin -üst sıradaki Calabi-Yau'nun ayna imgesi olduğu varsayılan şeklin- *kesin şeklini* belirleyip sonra onunla ilişkili fiziği çıkarmaktı.

Candelas birkaç yıl önce ikinci işi -yani şekli tam olarak öğrenildikten sonra, alt sıradaki son Calabi-Yau uzayının fiziksel özelliklerini belirleme işini- gerçekleştirmeye yönelik bir süreç bulmuştu. Fakat onun yaklaşımı çok ağır hesaplar gerektiriyordu; bu yaklaşımı bizim örneğimize uygulayabilmek için akıllı bir bilgisayar

programına ihtiyacımız olduğunu anlamıştık. Tanınmış bir fizikçi olmasının yanı sıra mükemmel bir bilgisayar programcısı da olan Aspinwall bu işi üstlendi. Morrison ve ben de ilk işi yapmaya, yani ayna Calabi-Yau uzayı olmaya aday Calabi-Yau uzayının kesin şeklini belirleme işine koyulduk.

Tam da bu noktada, Batyrev'in yaptığı çalışmanın bize önemli bazı ipuçları sunabileceğini düşündük. Fakat matematik ile fizik arasındaki kültürel ayrım -bizim durumumuzda Morrison ile benim aramdaki- bir kere daha ilerlememize sekte vurmaya başladı. Eğer doğanın dağarcığında sönme yırtılmaları varsa, üst sıradaki Calabi-Yau şekilleriyle aynı fiziksel evrene karşılık gelmesi gereken alt sıradaki Calabi-Yau şekillerinin *matematiksel* biçimini bulmak için, iki disiplinin güçlerini birleştirmemiz gerekiyordu. Fakat ikimiz de diğerinin dilini, bu amaca nasıl ulaşacağımızı açıkça görecek kadar iyi bilmiyorduk. Biraz dişimizi sıkmamız gerekecekti: Birbirimize uzmanlık alanlarımızda yoğunlaştırılmış kurs vermemiz gerekiyordu. Böylece gündüzlerimizi planladığımız gibi hesaplarımız üzerinde çalışarak, akşamlarımızı da tek öğrencilik derslerde, hem öğrenci hem öğretmen olarak geçirmeye karar verdik: Ben Morrison'a çalışmamızla ilgili fizik üzerine bir iki saat ders verecektim, o da bana çalışmamızla ilgili matematik üzerine bir iki saat ders verecekti. Okulumuz genelde geceleri 11.00'de bitecekti.

Programımızı hiç ara vermeden sürdürdük. Yavaş ilerliyorduk, fakat bir şeylerin yavaş yavaş yerine oturduğunu hissedebiliyorduk. Bu arada Witten daha önce fark ettiği zayıf halkayı yeniden formüle etme konusunda ciddi ilerleme kaydediyordu. Yaptığı çalışma, sicim kuramı fiziği ile Calabi-Yau uzaylarının matematiğini birbirlerine çevirmenin yeni ve daha etkili bir yöntemini oluşturuyordu. Aspinwall, Morrison ve ben hemen hemen her gün Witten'le ayaküstü toplantılar yapıyorduk; Witten yaklaşımının beraberinde getirdiği yeni kavrayışları bize aktarıyordu. Elaftalar geçtikçe, Witten'in bizimkinden tümüyle farklı bir bakış açısıyla gerçekleştirdiği çalışmanın hiç beklenmedik bir biçimde sönme geçişleri konusuna yöneldiği yavaş yavaş açıklık kazandı. Eğer hesaplarımızı en kısa zamanda bitirmezsek, Witten'in bizi geçeceğini anlamıştık.

Altı Kutu Bira ve Haftasonu Çalışmaları

Bir fizikçinin zihnini yaptığı işe yoğunlaştırmasını sağlamak konusunda sağlıklı bir rekabet gibisi yoktur. Aspinwall, Morrison ve ben vites yükselttik. Fakat şunu hemen belirteyim, bunun anlamı Morrison ve benim için başkaydı, Aspinwall için başka. Aspinwall, büyük ölçüde lisans ve yüksek lisans öğrencisi olarak Oxford'da geçirdiği on yılın bir yansıması olan üst sınıf İngiliz duyarlılığının ve hafifçe kendini belli eden afacanlara özgü bir yaramazlığın ilginç bir karışımıdır. Çalışma alışkanlıklarına gelince, herhalde tanıdığım en uygar fizikçidir. Birçoklarımız gece boyu çalışırken, o hiç beşten sonra çalışmaz. Birçoğumuz haftasonlan çalışırken, o hiç çalışmaz. Bunu kaldırabilir, çünkü hem zekidir hem de çok verimli çalışır. Onun için vites yükseltmek, verimliliğini artırmak anlamına geliyordu, o kadar.

O sıralarda Aralık başlarıydı. Morrison ve ben birkaç aydır birbirimize ders veriyorduk ve çabalarımızın karşılığını almaya da başlamıştık. Aradığımız Calabi-Yau uzayının tam şeklini belirlemeye çok yaklaşmıştık. Dahası Aspinwall bilgisayar programını neredeyse bitirmişti ve bizim sonuca varmamızı bekliyordu; bulduğumuz sonuç onun yazdığı programın girdi verisi olacaktı. Nihayet bir perşembe akşamı, aradığımız Calabi-Yau şeklini nasıl belirleyebileceğimizi bulduk. Bu, hayli basit bir bilgisayar programı yazılmasını gerektiren bir süreçten ibaretti. Cuma öğleden sonra programı yazıp kusurlarını gidermiştik; cuma gecesi geç saatlerde de aradığımız sonucu elde etmiştik.

Fakat saat beşi geçmişti ve günlerden de cumaydı. Aspinwall eve gitmişti, pazartesiye kadar da gelmezdi. Onun yazdığı bilgisayar programı olmaksızın yapabileceğimiz bir şey yoktu. Morrison da ben de bütün bir haftasonunu bekleyerek geçirmeyi düşünemiyorduk. Uzun süredir üstüne kafayorulan, kozmosun dokusunda uzamsal yırtılmalar olup olmadığı sorusunu cevaplamanın eşiğine gelmiştik; gerilim kaldıramayacağımız kadar büyüktü. Aspinwal1'u evinden aradık. İlk önce, ertesi sabah gelip çalışması ricamızı geri çevirdi,

ama epeyce bir homurdandıktan sonra bize katılmayı razı oldu; fakat kendisine altı kutu bira almamız koşuluyla. Kabul ettik.

Hakikat Anı

Planladığımız gibi cumartesi sabahı Enstitü'de toplandık. Güneşli bir sabahtı, neşeli ve rahat bir havamız vardı. Ben kendi adıma Aspinwal1'un gelmeyeceğini düşünmüştüm; geldiğinde bir 15 dakika, ilk kez haftasonu işe gelmesinin önemine dair övgü dolu bir konuşma yaptım. Bir daha olmayacağının garantisini verdi.

Morrison ve benim odamızda, Morrison'ın bilgisayarının başına toplandık. Aspinwall Morrison'a, yazdığı programı nasıl açacağını anlattı ve veriyi tam olarak hangi biçimde gireceğimizi gösterdi. Morrison, önceki gece ulaştığımız sonuçlara gereken biçimi verdi. Artık başlamaya hazırdık.

Kabaca söylenecek olursa yapacağımız hesap, belli bir parçacık türünün (belli bir sicim titreşim örüntüsünün), bütün bir sonbaharı Calabi-Yau bileşenini belirlemek için harcadığımız bir evrende hareket ederkenki kütlesini belirlemeye yönelikti. Daha önce tartıştığımız stratejiye göre, bulacağımız kütlenin, uzayda yırtılmaya yol açan bir sönme geçişinden sonra ortaya çıkan Calabi-Yau şekli üzerinde yaptığımız benzer bir hesaplama sonucunda bulduğumuz kütleyle aynı olacağını umuyorduk. Bu bahsettiğim hesap görece kolay olan hesaptı; haftalar önce tamamlamıştık ve sonuç, kullandığımız özel birimler cinsinden, 3 çıkmıştı. Şimdi, ayna ikizi olduğunu düşündüğümüz şekille ilgili hesabı bilgisayar üzerinde sayısal olarak yaptığımızdan, tam 3 değil ama ona çok yakın bir sonuç, yani yuvarlama hatalarından doğacak çok çok küçük bir fark nedeniyle 3,000001 ya da 2,999999 gibi bir sonuç elde etmeyi bekliyorduk.

Morrison bilgisayarın başına oturmuştu, parmağı "enter" tuşunun üzerindeydi. Gerilim tırmanırken "İşte başlıyor" diyerek, programı başlattı. Bilgisayar birkaç saniye içinde cevabı verdi: 8,999999. Bir anda bütün umudumu kaybettim. Uzayda yırtılmaya yol açan sönme

geçişleri ayna ilişkisini bozuyor, bu da aslında sönme geçişleri olamayacağını mı gösteriyordu? Ama neredeyse hemen, bir tuhaflık olması gerektiğini fark ettik. Eğer bu iki şekilden kaynaklanan fizikte gerçek bir uyumsuzluk olsaydı, bilgisayarın tam sayıya bu kadar yakın bir cevap vermesi neredeyse imkânsızdı. Eğer fikirlerimiz yanlış olsaydı, bu sefer de tamamen rasgele bir rakamlar dizisi elde etmemiz gerekirdi. Yanlış bir sonuç almıştık, fakat muhtemelen basit bir aritmetik hata yaptığımızı gösteren bir sonuçtu bu. Aspinwall ve ben tahtaya geçtik ve hatamızı hemen bulduk: Haftalar önce yaptığımız "basit" hesapta bir 3 çarpanını gözden kaçırmıştık; gerçek sonuç 9'du. Dolayısıyla bilgisayarın verdiği cevap, tam istediğimiz cevaptı.

Her şey olup bittikten sonra bir uyuşma olduğunu görmenin ancak kısmi bir inandırıcılığı vardır tabi ki. Eğer aradığınız cevabı biliyorsanız, o cevabı elde etmenin bir yolunu bulmak genelde çok kolaydır. Başka bir örnek daha çözmemiz gerekiyordu. Gerekli bilgisayar programı zaten yazılmış olduğu için bunu yapmak zor değildi. Üst sıradaki Calabi-Yau şekli için başka bir parçacığın kütlesini, bu kez hata yapmamaya özen göstererek hesapladık. Bulduğumuz sonuç 12'ydi. Bir kez daha bilgisayarın başına toplanıp programı çalıştırdık. Birkaç saniye sonra sonuç 11,999999 olarak geldi. Sonuçlar *tutuyordu.* Ayna ikizi olduğu varsayılan şeklin gerçekten ayna ikizi *olduğunu,* dolayısıyla uzayda yırtılmaya yol açan sönme geçişlerinin sicim kuramı fiziğinin bir parçası olduğunu göstermiştik.

Sandalyemden fırladım, dizginlenemez bir coşkuyla odada bir zafer turu attım. Morrison, bilgisayarın başında gülümsüyordu. Ama Aspinwal1'un tepkisi farklıydı. "Harika, işe yarayacağını biliyordum." dedi sakin sakin. "Peki, biralarım nerede?"

Itten'in Yaklaşımı

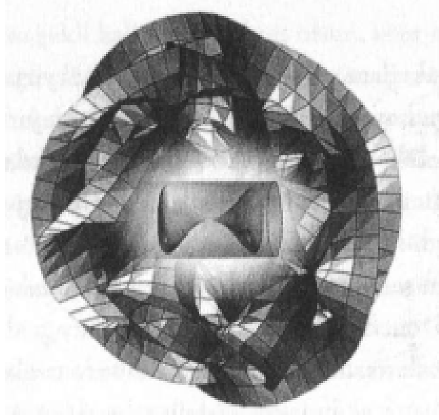
Pazartesi günü zafer kazanmış kişilerin edasıyla Witten'in yanına gidip başarımızı anlattık. Bulduğumuz sonuç onu çok sevindirdi. Anlaşıldı ki, o da sicim kuramında sönme geçişlerinin gerçekleştiğini

kanıtlamanın bir yolunu bulmuştu. Onun savı bizimkinden çok farklıydı, uzamsal yırtılmaların neden felakete yol açmadığına dair mikro kavrayışı önemli ölçüde açıklıyordu.

Witten'in yaklaşımı, bu tür yırtılmalar oluştuğunda bir nokta parçacık kuramı ile sicim kuramı arasında nasıl bir fark görüleceğini ortaya koyuyordu. İki kuram arasındaki belirleyici fark, yırtığın yakınlarında iki tür sicim hareketi, ama bir tür nokta parçacık hareketi olmasıdır. Yani, bir sicim tıpkı bir nokta parçacık gibi yırtığın hemen yanında ilerleyebilir, fakat aynı zamanda, Şekil 11,6'da görüldüğü gibi, ilerlerken yırtığı çevreleyebilir de. Witten'in analizi temelde, yırtığı çevreleyen sicimlerin (bir nokta parçacık kuramında olamayacak bir şey) kendilerini kuşatan evreni, aksi takdirde doğacak olan felaketlerden koruduğunu ortaya koyar. Sanki sicimin dünya-yaprağı -VI. Bölüm'den, bunun, bir sicimin uzayda hareket ederken taradığı ikiboyutlu bir yüzey olduğunu hatırlayalım- uzamsal dokudaki geometrik bozulmanın felakete yol açabilecek yönlerini tam olarak iptal eden bir koruyucu kalkan oluşturmaktadır.

Böyle bir yırtılma olursa ve eğer yakınlarda onu koruyacak bir sicim yoksa ne olur, diye sorabilirsiniz. Dahası, yırtılmanın meydana geldiği anda, bir sicimin -sonsuz derecede ince bir ilmeğin- ancak bir misket bombasına karşı bir hulahupun arkasına saklanmanın sağlayacağı korunma kadar etkili bir korunma sağlayacağını da düşünebilirsiniz. Bu iki problemin de çözümü, kuantum mekaniğinin IV. Bölüm'de tartıştığımız temel bir özelliğine dayanmaktadır. IV. Bölüm'de, Feynman'ın kuantum mekaniği formülasyonuna göre, parçacık ya da sicim bütün nesnelerin, bir yerden diğerine olası bütün yolları "koklayarak" ilerlediğini görmüştük. Sicimin sonuçta gözlenen hareketi bütün olasılıkların (kuantum mekaniğinin matematiğiyle tam olarak belirlenen olası yolların her birinin göreli katkısıyla) bir bileşimidir. Uzayın dokusunda bir yırtılma olursa, hareket etmekte olan sicimlerin olası yolları arasında (Şekil 11.6'da görülenlere benzer yollar) yırtılmayı çevreleyen yollar da yer alacaktır. Yırtılma olduğu anda yakında hiç sicim görünmüyor olsa bile, kuantum mekaniği, olası bütün sicim yollarının fiziksel etkilerini dikkate alır. Bu yollar arasında yırtılmayı çevreleyen çok sayıda

(aslına bakarsanız sonsuz sayıda) koruyucu yol da bulunmaktadır. Witten, yırtılmanın aksi takdirde yol açabileceği kozmik felaketi işte bu katkıların tam olarak iptal ettiğini göstermişti.



Şekil 11.6 Bir sicimin taradığı dünya-yaprağı, uzayın dokusunda olabilecek bir yırtılmayla ilişkili potansiyel felaketleri iptal eden bir kalkan yaratır.

Ocak 1993'te Witten ve biz üçümüz, makalelerimizi, fizik makalelerinin anında dünyanın her yerinden erişilebilir hale geldiği elektronik İnternet arşivinde aynı sıralarda yayımladık. Her iki makale de, farklı bakış açılarıyla *topoloji değiştiren geçişlerin* -uzayda yırtılmaya yol açtığını bulduğumuz süreçlerin teknik ismi- ilk örneklerini betimliyordu. Uzun zamandır cevap bekleyen, uzayın dokusunun yırtılıp yırtılamayacağı sorusu, sicim kuramıyla niceliksel olarak cevaplanmıştı.

Sonuçlar

Fiziksel felaketlere yol açmadan da uzamsal yırtılmalar olabileceğini ortaya koymuştuk. Peki uzamsal doku yırtıldığında ne *olur?* Gözlenebilir sonuçları nelerdir? Etrafımızdaki dünyanın birçok özelliğinin, kıvrılmış boyutların ayrıntılı yapısına bağlı olduğunu gördük. Bu yüzden de, Şekil 11.5'te gösterildiği gibi, bir Calabi-Yau şeklinin çok farklı başka bir Calabi-Yau şekline dönüşmesinin önemli bir fiziksel etkisi olacağı düşünülebilir. Fakat aslına bakarsanız, uzayları gözümüzde canlandırabilmek için kullandığımız az boyutlu

çizimler, bu dönüşümün aslında olduğundan daha karmaşıkmış gibi görünmesine neden olur. Eğer 6 boyutlu geometriyi gözümüzde canlandırabilseydik, uzayın dokusunun yırtıldığını, fakat bunun hayli yumuşak bir biçimde gerçekleştiğini görürdük. Eski bir pantolonun dizinden yırtılmasından çok, bir güvenin yün bir kazağı yemesi gibi.

Bizim çalışmamız ve Witten'in çalışması, fiziksel özelliklerin, örneğin sicim titreşimi ailesi sayısının ve her ailedeki parçacık tiplerinin bu süreçlerden etkilenmediğini gösteriyordu. Bir Calabi-Yau uzayının yırtık oluştukça değişmesinden etkilenebilecek şey, tek tek parçacıkların kütlelerinin tam değerleri, yani olası sicim titreşim örüntülerinin enerjileridir. Makalelerimiz, uzayın Calabi-Yau bileşeninin geometrik şeklinin değişmesine karşılık bu kütlelerin sürekli olarak değişeceğini, bazılarının kütlesi artarken, bazılarınınkinin azalacağını gösteriyordu. Fakat asıl önemli olan şudur: Yırtılma gerçekten meydana geldiğinde bu değişen kütlelerde felakete yol açan bir sıçrama, bir sivrilme ya da olağanüstü herhangi bir özellik ortaya çıkmaz. Fiziğin bakış açısından, yırtılma anının ayırt edici bir özelliği yoktur.

Bu noktada iki konu gündeme gelir. Öncelikle, evrenin fazladan 6 boyutlu Calabi-Yau bileşeninde gerçekleşen uzamsal doku yırtılmalarına odaklanmıştık. Daha aşina olduğumuz üçboyutlu uzamda da bu tür yırtılmalar meydana gelebilir mi? Cevap, neredeyse kesinlikle evettir. Ne de olsa uzay uzaydır; ister bir Calabi-Yau şekli halinde kıvrılmış olsun, ister açık ve yıldızlı bir gecede gördüğümüz evrenin muazzam genişliği boyunca uzayıp gitsin. Aslına bakarsanız, bildiğimiz uzamsal boyutların da aslında kıvrılmış olabileceklerini, evrenin öbür tarafına doğru kendi üstüne katlanan devasa bir şekil meydana getiriyor olabileceklerini, dolayısıyla kıvrılmış boyutlar ve açık boyutlar arasındaki ayrımın bir bakıma yapay olduğunu daha önce görmüştük. Bizim analizimiz ve Witten'in analizleri, Calabi-Yau şekillerinin özel matematiksel özelliklerine dayanıyor olsa da, sonucun -uzayın dokusu yırtılabilir- kesinlikle daha geniş bir uygulama alanı vardır.

İkincisi, topoloji değiştiren böyle bir yırtılma bugün yarın gerçekleşebilir mi? Geçmişte yaşanmış olabilir mi? Evet. Temel parçacık kütlelerinin deneysel ölçümleri, değerlerinin zaman içinde hayli istikrarlı olduğunu gösteriyor. Fakat Büyük Patlama'dan sonraki ilk evrelere dönecek olursak, sicime dayalı olmayan kuramlar bile, temel parçacık kütlelerinin zaman içinde değiştiği önemli dönemler olduğunu gösterir. Sicim kuramının bakış açısına göre, bu dönemler kuşkusuz bu bölümde tartıştığımız topoloji değiştiren yırtılmaları da içeriyordu. Günümüze yaklaştıkça temel parçacıkların kütlelerinde gözlenen istikrar, eğer evren halihazırda topoloji değiştiren biryırtılma geçiriyorsa, bunun son derece yavaş gerçekleşiyor olması gerektiğini gösterir. O kadaryavaş ki, bu yırtılmanın temel parçacık kütleleri üzerindeki etkisi, günümüzde yapabildiğimiz deneylerin duyarlılığından daha düşüktür. Dikkat çekici bir nokta var: Biraz önce bahsettiğimiz koşul geçerliyse, evren şu anda uzamsal bir yırtılmanın ortasında olabilir. Yeterince yavaş gerçekleşiyorsa, bunu bilmeyiz bile. Ortada gözlenebilir ve çarpıcı bir olgu bulunmamasının büyük heyecan yaratması, fizikte ender rastlanan bir durumdur. Bu kadar egzotik bir geometrik değişimin gözlenebilir bir felaketle sonuçlanmaması, sicim kuramının Einstein'ın düşündüğünün ne kadar ötesine geçtiğinin bir kanıtıdır.

XII. Bölüm

Sicimlerin Ötesi: M-Kuramı Arayışı

Einstein, uzun süren o birleşik kuram arayışı sırasında "Tanrı dünyayı farklı bir biçimde yaratmış olabilir miydi acaba; mantıksal basitlik zorunluluğu, serbestliğe hiç yer bırakıyor mu acaba," diye düşünmüştü. Einstein bu sözüyle, bugün birçok fizikçinin paylaştığı bir görüşün ilk halini dile getiriyordu: Doğaya dair nihai bir kuram varsa eğer, bu kuramın biçimini destekleyen en inandırıcı savlardan biri de, kuramın başka türlü olamayacağı olacaktır. Nihai kuramın, olduğu biçimde olması gerekir, çünkü evreni bir iç tutarsızlığa ya da mantıksal tutarsızlığa düşmeksizin betimleme yetisine sahip tek açıklayıcı çerçevedir. Böyle bir kuram şeylerin oldukları gibi olduklarını, çünkü böyle olmaları gerektiğini ileri sürecektir. Bütün değişiklikler, her biri, ne kadar küçük olurlarsa olsunlar, kendi yıkımının tohumlarını atan bir kurama yol açacaklardır; "Bu cümle yalandır," önermesinde olduğu gibi.

Evrenin yapısındaki böyle bir kaçınılmazlığı kanıtlamak, asırlardır varlığını koruyan en derin sorulardan bazılarını cevaplama yolunda uzun bir yol almamızı gerektirecektir. Bu sorular, evrenimizin tasarlanması için gerekli olduğu belli, sayılamayacak kadar çok tercihi kimin ya da neyin yaptığıyla ilgili gizeme dikkat çekmektedir. Kaçınılmazlık, seçenekleri silerek bu soruları cevaplar. Kaçınılmazlık, aslında hiçbir tercih olmadığı anlamına gelir. Kaçınılmazlık, evrenin başka türlü olamayacağını ortaya koyar. XIV. Bölüm'de de tartışacağımız üzere, evrenin bu kadar sıkı biryapıya sahip olmasını garanti eden bir şey yoktur. Yine de, doğa yasalarında böyle bir katılık aramak, modern fizikteki birleştirici programın kalbinde yatmaktadır.

1980'lerin sonlarına gelindiğinde, fizikçiler, sicim kuramı evrenin benzersiz bir tablosunu sunmaya yaklaşmış olsa da, bunu pek başaramadığı görüşündeydi. Bunun iki sebebi vardır. İlki, VII. Bölüm'de kısaca belirttiğimiz üzere, fizikçilerin sicim kuramının

aslında *beş* ayrı versiyonu olduğunu görmesiydi. Bunlara Tip I, Tip IIA, Tip IIB, Heterotik O (32) (kısaca Heterotik-O) ve Heterotik E, x E, (kısaca Heterotik E) kuramları dendiğini hatırlayabilirsiniz. Birçok temel özellik çoğunda ortaktır: Titreşim örüntüleri olası kütle ve kuvvet yüklerini belirler, hepsi de toplam 10 uzay-zaman boyutunun varlığını gerektirir, kıvrılmış boyutlar Calabi-Yau şekillerden birinin şeklinde olmalıdır vs. Bu yüzden de önceki bölümlerde bu kuramlar arasındaki farklılıklar üzerinde durmamıştık. Yine de 1980'lerde yapılan analizler, bu kuramların birbirinden farklı olduğunu göstermiştir. Kuramların özellikleri hakkında bilgilenmek için dipnotlara bakabilirsiniz, fakat süpersimetriye yer verme biçimlerinin yanı sıra, destekledikleri titreşim örüntülerinin önemli ayrıntıları konusunda birbirlerinden ayrıldıklarını bilmeniz yeter. (Örneğin Tip I sicim kuramında, bizim odaklanmış olduğumuz kapalı ilmeklerin yanı sıra, uçları bağlanmamış, açık sicimler de vardır.)

Sicim kuramcılarını mahcup eden bir durumdur bu, nihai birleşik kuram için ciddi bir öneriye sahip olmak etkileyici olsa da, beş ayrı öneri ortaya koymak, önerilerin her birinin ağırlığını ciddi biçimde azaltmaktadır.

Kaçınılmaz olandan ikinci sapma, daha incedir. Bunu tam anlamıyla değerlendirebilmek için, bütün fizik kuramlarının iki kısımdan oluştuğunu unutmamalısınız. İlk kısım, kuramın, genellikle matematiksel denklemlerle ifade edilen temel fikirler koleksiyonudur. İkinci kısım denklemlerin çözümlerinden oluşur. Genel itibarıyla, bazı denklemlerin bir tek, bazılarının ise birden fazla çözümü vardır. (Basit bir örnek verelim: "Bir sayının iki katı 10'a eşittir" denkleminin bir tek çözümü vardır: 5. Fakat "Bir sayının 0 katı 0'a eşittir" denkleminin sonsuz sayıda çözümü vardır, çünkü bütün sayıların 0 katı 0'a eşittir.) Bu yüzden de araştırmalar, bizi benzersiz denklemlere dayanan benzersiz bir kurama götürse de, denklemlerin birçok farklı olası çözümü olduğundan kaçınılmazlığın tehlikeye girmesi söz konusu olabilir. 1980'lerin sonlarına gelindiğinde, sicim kuramında da durum buymuş gibi görünüyordu. Örneğin fizikçiler beş sicim kuramından herhangi birinin denklemlerini incelediklerinde, bu denklemlerin birçok çözümü olduğunu görmüşlerdi; örneğin

ekstra boyutlar birçok farklı olası kıvrılma biçimine sahiptir; çözümlerin her biri farklı özelliklere sahip bir evrene tekabül eder. Bu evrenlerin çoğu, sicim kuramı denklemlerinin geçerli çözümleri olarak doğsalar da, bildiğimiz biçimiyle dünyayla bir ilgileri yoktur.

Kaçınılmazlıktan bu sapmalar, sicim kuramının talihsiz temel özellikleri gibi görünebilir. Fakat 1990'ların ortalarından beri yapılan araştırmalar, bu özelliklerin, sicim kuramcılarının kuramı analiz etme biçimlerinin bir yansımasından ibaret olduğu yolunda yeni bir ümit vermiştir. Kısaca söyleyecek olursak, sicim kuramı denklemleri o kadar karmaşıktır ki, kesin biçimlerini kimse bilmiyor. Fizikçiler bu denklemlerin sadece yaklaşık versiyonlarını kaleme almayı başarmışlardır. Sicim kuramları arasındaki ciddi farklılıklar işte bu yaklaşık denklemlerde yatmaktadır. Beş sicim kuramından herhangi biri bağlamında bir çözümler bolluğuna, bir istenmeyen evrenler bolluğuna yol açan da işte bu yaklaşık denklemlerdir.

1995'ten, ikinci süpersicim devriminin başlangıcından bu yana, kesin biçimlerine hâlâ erişemediğimiz asıl denklemlerin bu sorunları çözebileceği, böylece sicim kuramına kaçınılmazlık damgasının vurulmasını sağlayacağı yolunda kanıt sayısı giderek artmaktadır. Aslına bakarsanız, kesin denklemler anlaşıldığında; bunların, beş sicim kuramının da aslında yakından ilişkili olduğunu göstereceği, sicim kuramcılarının çoğunu tatmin edecek şekilde kanıtlanmıştır. Bir denizyıldızının kolları gibi, hepsi de, ayrıntılı özellikleri halen yoğun bir biçimde araştırılmakta olan tek bir bütünün parçalarıdır. Fizikçiler beş ayrı kurama sahip olmak yerine, beşini de benzersiz bir kuramsal çerçevede birleştiren *tek* bir kuram olduğu inancındadır artık. Tıpkı bugüne kadar gizli olan ilişkilerin gözler önüne serilmesiyle ortaya çıkan netlik gibi, bu birlik de sicim kuramına göre evreni anlamak için yeni ve güçlü bir duruş noktası sunmaktadır.

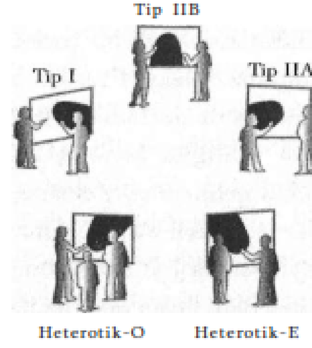
Bu görüşleri açıklayabilmek için sicim kuramındaki en zor, en yeni gelişmelerden bazılarına değinmemiz gerekiyor. Sicim kuramını incelerken kullanılan yaklaşıklıkların niteliğini ve onlara içkin sınırları anlamamız gerekiyor. Fizikçilerin bu yaklaşıklıkları aşmak için başvurduğu akıllıca tekniklere -hepsine birden *ikilikler* denir- aşinalık

kazanmamız gerekiyor. Sonra da, yukarıda bahsettiğimiz dikkat çekici görüşlere ulaşmak için bu tekniklerden yararlanan ince akıl yürütmeyi izlememiz gerekiyor. Fakat endişelenmeyin. Sicim kuramcıları asıl zor işi çoktan tamamlamış bulunuyor, bizler onların vardığı sonuçları açıklamakla yetineceğiz.

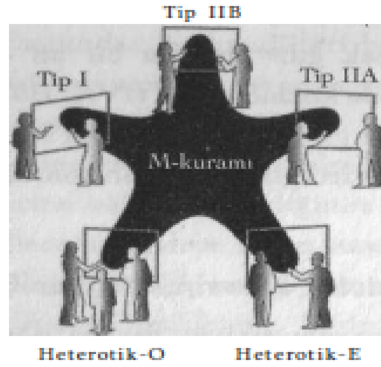
Gelgeldim, geliştirmemiz ve sonra da bir araya getirmemiz gereken birbirinden ayrı çok fazla parça varmış gibi göründüğünden, özellikle bu bölümde ağaçlara bakarken ormanı kolayca gözden kaçırabilirsiniz. Bu yüzden, bu bölümde tartışma biraz karmaşıklaşacak gibi olur da bir an önce kara delikler (XIII. Bölüm) ya da kozmolojiyle (XIV. Bölüm) ilgili bölümlere geçmek isteyecek gibi olursanız, ikinci süpersicim devriminin kilit görüşlerini özetlediğimiz bundan sonraki kısma hemen bir göz atıverin.

İkinci Süpersicim Devriminin Bir Özeti

İkinci süpersicim devriminin başlıca görüşü Şekil 12.1 ile 12.2'de özetlenmiştir. Şekil 12.1'de fizikçilerin sicim kuramını analiz ederken geleneksel olarak kullandığı yaklaşık yöntemlerin ötesine (kısmen de olsa) geçme konusunda son dönemde kazandıkları beceri öncesindeki durum görülüyor. Beş sicim kuramının tamamen birbirinden ayrı olarak düşünüldüğünü görüyoruz. Fakat son araştırmalardan doğan yeni görüşlerle birlikte. Şekil 12.2'de olduğu gibi, denizyıldızının beş kolu gibi, bütün sicim kuramlarının artık her şeyi içine alan tek bir çerçeve olarak görüldüğünü görüyoruz. (Aslına bakarsanız, bu bölümün sonuna geldiğimizde, altıncı bir kuramın daha -altıncı bir kol- bu birliğe ekleneceğini göreceğiz.) Bu her şeyi kapsayan çerçeveye, tartışmamızın ilerlemesiyle açıklık kazanacak sebeplerden ötürü M-kuramı denmiştir.



Şekil 12.1 Beş sicim kuramı üzerinde çalışan fizikçiler yıllarca, tümüyle farklı kuramlar üzerinde çalıştıklarım düşündü.



Şekil 12.2 ikinci süpersicim devriminin sonuçları, beş sicim kuramının da aslında, geçici olarak M-kuramı denilen tek bir birleşik çerçevenin parçası olduğunu göstermişti.

Şekil 12.2, nihai kuram arayışında köşe taşı niteliğinde olan bir başarıyı resmeder. Sicim kuramının, görünüşe bakılırsa birbirinden ayrı ilerleyen araştırma kolları artık tek bir dokuda -benzersiz, her şeyi içeren, pekâlâ uzun zamandır aranan o her şeyin kuramı olabilecek bir kuramda- birleştirilmiştir.

Geride yapılacak çok iş kalsa da, M-kuramının fizikçiler tarafından ortaya çıkarılmış iki temel özelliği vardır. İlki, M-kuramında 11 boyut bulunmasıdır (10 uzay, 1 zaman boyutu). Kaluza'nın, ek bir uzamsal boyutun genel görelilik kuramı ile elektromanyetizma kuramının hiç beklenmedik biçimde birleşmesini mümkün kıldığını ortaya

çıkarmasında olduğu gibi, sicim kuramcıları da sicim kuramındaki ek bir uzamsal boyutun -önce-ki bölümlerde tartıştığımız 9 uzay, 1 zaman boyutu dışında- kuramının beş versiyonunun da derinden tatmin edici bir biçimde birleşmesini mümkün kıldığını anlamışlardır. Dahası bu ek uzamsal boyut havadan gelmemiştir; aksine, sicim kuramcıları, 1970'lerde ve 1980'lerde geçerli olan, 1 zaman ve 9 tane de uzay boyutu olduğunu söyleyen akıl yürütmenin *yaklaşık* olduğunu; artık tamamlanabilecek olan kesin denklemlerin bugüne dek atlanmış olan bir uzamsal boyut daha olduğunu gösterdiğini anlamışlardır.

M-kurammm keşfedilmiş olan ikinci özelliği, titreşen sicimler içermesinin yanı sıra başka nesneleri de kapsamasıdır: Titreşen ikiboyutlu zarlar, dalgalanan üçboyutlu kabarcıklar ve bir sürü başka bileşen. 11. boyutta olduğu gibi, M-kuramının bu özelliği, hesaplar 1990 ortalarından önce kullanılan yaklaşıklıklardan temizlendiğinde ortaya çıkmıştır.

Bunlar ve son birkaç yılda edinilen başka görüşler dışında, M-kuramının gerçek niteliği bir muammadır; ileri sürüldüğü üzere "M"'nin bir anlamı da budur: Muamma. Dünyanın dört bir yanında fizikçiler, büyük bir azimle M-kuramına dair tam bir anlayışa ulaşmaya çalışmaktadır; 21. yüzyıl fiziğinin temel problemi de pekâlâ bu olabilir.

Bir Yaklaşıklık Yöntemi

Fizikçilerin sicim kuramını analiz etmek için kullanmakta olduğu yöntemlerin sınırları, *tedirginlik kuramı* denen bir şeye bağlıdır. Tedirginlik kuramı, bir soruya kabaca cevap vermeye çalışırken bir yaklaşıklık oluşturmaya, sonra da başta görmezden gelinen ince ayrıntıları daha yakından inceleyerek bu yaklaşıklığı sistematik olarak geliştirmeye verilen incelikli isimdir. Bu kuram, bilimsel araştırmanın birçok alanında çok önemli bir rol oynar ve sicim kuramının anlaşılmasında da temel unsur olmuştur, ayrıca birazdan göstereceğimiz gibi, günlük hayatımızda da sık sık rastladığımız bir şeydir.

Diyelim ki bir gün otomobiliniz arızalandı, bir tamirciye gidip baktıracaksınız. Arabanızı tamirciye götürüyorsunuz, şöyle bir bakıp kötü haberi veriyor. Arabanın motorunun değişmesi gerekiyor; parçalar ve işçilik genellikle 900 dolar tutar. Bu, yaklaşık değer alanına dayanan bir tahmindir, yapılması gereken işin ince ayrıntıları belirginlik kazandıkça bu tahminin de kesinlik kazanmasını beklersiniz. Birkaç gün sonra, teknisyen otomobilde başka testler de yapmaya vakit bulduktan sonra, daha kesin bir fiyat verir: 950 dolar. Yeni bir regülatöre ihtiyacınız olduğunu söyler, parçalar ve işçilik yaklaşık 50 dolar tutacaktır.

Nihayetinde otomobili almaya gittiğinizde bütün ayrıntıları toplar ve önünüze 987,93 dolarlık bir fatura koyar. Motor ve regülatör için 950 dolar, fan kayışı için 27 dolar, akü kablosu için 10 dolar, izolasyon cıvatası için 0,93 dolar yazdığını açıklar. Başta 900 dolar olarak verdiği yaklaşık rakam başka birçok ayrıntının dahil olmasıyla kesinleşmiştir. Fizik terimleriyle bakıldığında, bu ayrıntılara, ilk tahminde meydana gelen *tedirginlikler* (pertürbasyonlar) denir.

Tedirginlik kuramı etkili bir biçimde uygulandığında, ilk tahmin nihai cevaba makul ölçüde yakın olacaktır; ilk tahminde görmezden gelinen ince ayrıntılar işin içine dahil edildiğinde kesin sonuçta küçük farklılıklara yol açacaktır. Fakat bazen nihai faturayı ödemeye gittiğinizde, ilk tahminle aradaki farkı görüp şoka girersiniz. Daha duygusal başka terimler de kullanabilirsiniz tabü, ama teknik olarak buna *tedirginlik kuramı hatası* denir. Bu da ilk tahminin nihai cevap için iyi bir rehber olmadığı, çünkü "ince ayrıntıların" yaklaşık değer tahmininde nispeten küçük sapmalar yerine, büyük değişikliklere yol açtığı anlamına gelir.

Önceki bölümlerde kısaca gösterildiği üzere, bu noktaya kadar sicim kuramı tartışmamız otomobil tamircisinin kullandığına benzer tedirginliklere dayalı (pertürbatif) bir yaklaşıma bağlıdır. Sicim kuramının zaman zaman atıfta bulunmuş olduğumuz "yetersiz anlaşılmasının kökleri, şu veya bu biçimde bu yaklaşıklık yöntemine uzanmaktadır. Gelin, tedirginlik kuramını, sicim kuramı kadar soyut olmayan ama sicim kurammdaki uygulamaya otomobil tamircisi

örneğinden daha yakın olan bir bağlamda tartışarak bu önemli kavramı anlamaya çalışalım.

Klasik Bir Tedirginlik Kuramı Örneği

Dünyanın hareketini Güneş sistemi üzerinden anlamak, tedirginlik kuramına dayalı bir yaklaşım kullanmanın klasik bir örneğidir. Bu tür büyük mesafe ölçeklerinde, yalnızca kütleçekimi kuvvetini değerlendirmemiz gerekir, fakat başka yaklaşıklıklar kurulmazsa eğer, karşımıza çıkan denklemler son derece karmaşık olacaktır. Hem Newton'a hem Einstein'a göre, her şeyin başka her şey üzerinde kütleçekimi kuvveti uyguladığını, bunun da bizi hemen, Dünya'yi, Güneş'i, Ay'ı, başka gezegenleri, prensipte göklerdeki bütün cisimleri içine alan karmaşık ve matematiksel olarak kolayca içinden çıkılamayacak bir kütleçekimi savaşma götürdüğünü hatırlayalım. Tahayyül edebileceğiniz gibi, bütün bu etkileri hesaba katıp Dünyanın hareketini kesin olarak belirlemek imkânsızdır. Aslında yalnızca üç gökcismi hesaba katıldığında bile, denklemler o kadar karmaşık bir hâl alır ki, şimdiye kadar kimse tam anlamıyla çözememiştir.

Yine de tedirginlik kuramına dayalı bir yaklaşım kullanarak Dünyanın hareketini Güneş sistemi üzerinden büyük bir isabetlilikle tahmin *edebiliriz.* Güneş'in, Güneş sistemimizin diğer gezegenlerine kıyasla muazzam bir kütleye sahip olması, diğer bütün yıldızlara kıyasla Dünyaya yakınlığı, onu, açık ara Dünyanın hareketi üzerindeki baskın etki unsuru kılmaktadır. Böylece yalnızca Güneş'in kütleçekimi etkisini değerlendirerek yaklaşık bir değer tahmini elde edebiliriz. Birçok amaç için bu kesinlikle yeterlidir. Gerekirse, Ay ya da o sırada en yakından geçmekte olan gezegenler gibi, konuyla bağlantısı en güçlü cisimlerin kütleçekimi etkilerini sırasıyla dahil ederek bu yaklaşıklığı biraz daha rafine bir hale getirebiliriz. Ortaya çıkmakta olan kütleçekimi etkileri ağı karmaşıklaştıkça hesaplar da zorlaşabilir, fakat bu durumun tedirginlik felsefemize gölge düşürmesine izin vermeyelim: Güneş ile Dünyanın kütle çekimsel etkileşimi, Dünyanın hareketine dair yaklaşık bir açıklama sunar, geri

kalan diğer kütleçekimi etkileri karmaşası ise çok daha küçük oranlı bir inceltmeler dizisi sunacaktır.

Bu örnekte tedirginlik yaklaşımı işe yarıyor, çünkü nispeten basit bir kuramsal betimlemeyi mümkün kılan baskın bir fiziksel etki söz konusu. Ama her zaman böyle olmaz. Örneğin üçlü bir sistem içinde birbirlerinin çevrelerinde dönmekte olan benzer kütleye sahip üç yıldızın hareketiyle ilgileniyorsak eğer, etkisi diğerlerini gölgede bırakan tek bir kütleçekimi ilişkisi yoktur ortada. Buna bağlı olarak yaklaşık bir değer tahminini mümkün kılan, diğer etkilerin küçük düzeltmeler yaratmasına yol açan tek bir baskın etkileşim yoktur. Tedirginlik yaklaşımına başvurup, diyelim ki yalnızca iki yıldız arasındaki kütleçekimi ilişkisini ele alıp bunu yaklaşık bir değer belirlemekte kullansaydık, yaklaşımımızın başarısız olduğunu çok geçmeden görürdük. Hesaplamalarımız, tahmin edilen hareketteki, üçüncü bir yıldızı işin içine dahil etmekten kaynaklanan "düzeltmenin" küçük olmadığını, aslında varsayılan yaklaşık değer kadar ciddi bir büyüklükte olduğunu gösterirdi. Buna aşinayız: Horon tepen üç insanın hareketi, tango yapan iki insanın hareketine pek benzemez. Büyük bir düzeltme, baştaki yaklaşıklığın işe yaramaz olduğunu ve bütün bir şemanın iskambil kâğıtları üzerine kurulu olduğunu gösterir. Bunun yalnızca, üçüncü yıldızdan kaynaklanan büyük düzeltmeyi dahil etmekle ilgili bir mesele olmadığını unutmamalısınız. Bir domino etkisi söz konusudur: Büyük düzeltmenin iki yıldızın hareketi üzerinde önemli bir etkisi olur, bunun da üçüncü yıldızın hareketi üzerinde büyük bir etkisi olur, o da diğer ikisini ciddi biçimde etkiler ve böyle devam edip gider. Burada kütleçekimi ağındaki bütün halatlar aynı derecede önemlidir ve hepsinin de aynı anda ele alınmaları gerekmektedir. Bu gibi durumlarda, genellikle tek çaremiz sonuçta ortaya çıkan hareketin simülasyonunu elde etmek için bilgisayarların kaba kuvvetine başvurmak olur.

Bu örnek, tedirginlik yaklaşımını uygularken, varsayılan yaklaşık değer tahminin gerçekten yaklaşık olup olmadığını belirlemenin önemini, eğer öyleyse arzulanan geçerlilik düzeyine ulaşmak için ince detayların hangilerinin ve kaçının dahil edilmesi gerektiğini

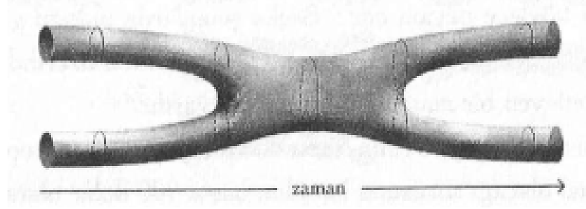
aydınlatıyor. Tartışmakta olduğumuz üzere, bu meseleler özellikle, tedirginlik araçlarının mikrodünyadaki fiziksel süreçlere uygulanması açısından kritik önem taşır.

Sicim Kuramına Tedirginlik Kuramı Açısından Bir Yaklaşım

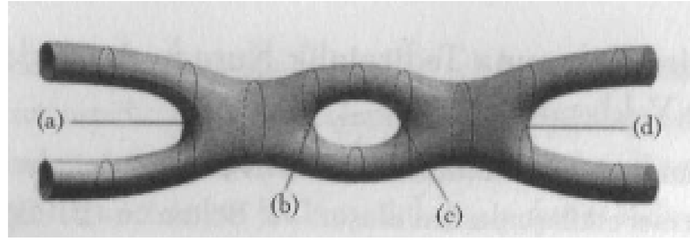
Sicim kuramındaki fiziksel süreçler, titreşen sicimler arasındaki temel etkileşimlerden oluşur. VI. Bölümün (VI. Bölüm'de "Daha net cevap" kısmını atlamış olan okurlar, bu kısmın başlangıç bölümüne göz gezdirmeyi yararlı bulabilir) sonuna doğru tartıştığımız üzere, bu etkileşimler sicim ilmeklerinin Şekil 6.7'de olduğu gibi (yeri geldiği için Şekil 12.3'te de tekrarladık) birbirlerinden ayrılmalarını ve birleşmelerini içerir. Sicim kuramcıları, Şekil 12.3'teki şematik resmin kesin bir matematiksel formülle nasıl ilişkilendirilebileceğini göstermiştir; gelen her bir sicimin diğerinin hareketi üzerindeki etkisini ifade eden bir formüldür bu. (Formülün ayrıntıları, sicim kuramlarının beşinde de farklıdır, fakat şimdilik bu tür ince unsurları bir kenara bırakacağız.) Kuantum mekaniği olmasaydı bu formül, sicimlerin etkileşim hikâyelerinin sonu olabilirdi. Fakat belirsizlik ilkesinin hükmettiği mikroskobik kargaşa, sicim/antisicim çiftlerinin (birbirine karşıt titreşim örüntüleri ortaya koyan iki sicim) evrenden enerji alarak bir anda varlık bulabileceği anlamına gelir; tabi, yeterince hızlı bir şekilde birbirlerini ortadan kaldırmaları, böylece enerji borçlarını ödemeleri koşuluyla. Kuantum çılgınlığından doğan fakat ödünç aldıkları enerjiyle var olan, dolayısıyla kısa süre içinde yeniden tek bir ilmek haline gelmeleri gereken bu sicim çiftleri *sanal sicim çiftleri* olarak bilinir.

Bu durum Şekil 12.4'te şematik olarak gösterilmiştir. Baştaki iki sicim, (a) diye belirtilen noktada birbirleriyle çarpışır, birleşip tek bir ilmek oluşturur. Bu ilmek biraz yol alır, ama (b)'de, çılgın kuantum dalgalanmaları sanal bir sicim çiftinin oluşmasına yol açar, bu çift yol alır, sonra (c) noktasında bir kez daha tek bir sicim oluşturarak ortadan kalkar. Son olarak (d) noktasında bu sicim bir çift sicime ayrılarak enerjisini boşaltır ve bu sicimler de başka yönlere doğru yol alırlar. Şekil 12.4'te merkezdeki tek ilmek yüzünden, fizikçiler buna "tek ilmek" süreci derler. Şekil 12.3'te resmedilen etkileşimde olduğu

gibi, kesin bir matematiksel formül bu şemayla ilişkilendirilebilir, böylece sanal sicim çiftinin ilk iki sicimin hareketi üzerindeki etkisi özetlenebilir.



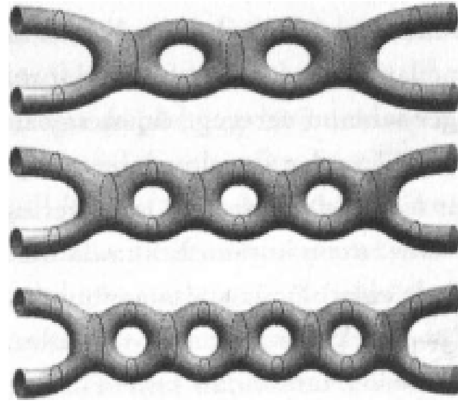
Şekil 12.3 Sicimler birleşerek ve ayrılarak etkileşim kurarlar.



Şekil 12.4 Kuantum çılgınlığı, bir sicim/antisicim çiftinin ortaya çıkmasına (b) ve ortadan kalkmasına (c) yol açabilir, böylece daha karmaşık bir etkileşim ortaya çıkar.

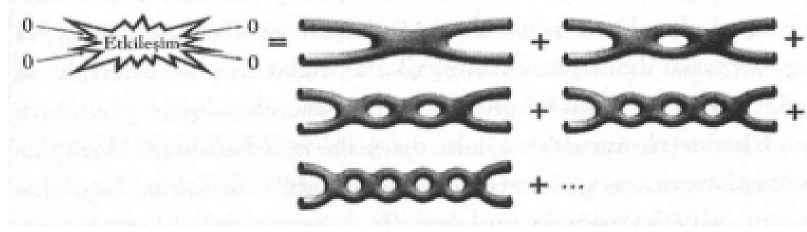
Fakat bu da hikâyenin sonu değildir, çünkü kuantum dalgalanmaları anlık sanal sicim doğuşlarının birçok kereler meydana gelmesine, bir sanal sicim çiftleri dizisinin oluşmasına yol açabilir. Bu da Şekil 12.5'te görüldüğü üzere daha fazla ilmeğin bulunduğu şemalara yol açacaktır. Bu şemaların her biri, gerçekleşen fiziksel süreçleri resmetmenin pratik ve basit bir yolunu ortaya koymaktadır: Gelen sicimler birleşirler, kuantum çalkalanmaları bu birleşme sonucu ortaya çıkan ilmeğin ayrılmasına, sanal bir sicim çiftinin oluşmasına yol açar, bu iki sicim yol alır, sonra birleşip tek bir ilmek oluşturarak birbirlerini ortadan kaldırır, o ilmek de yol alır ve başka bir sanal sicim çifti oluşturur, bu böylece devam eder. Başka şemalarda olduğu gibi, bu süreçlerin her biri için ilk sicim çiftinin hareketi üzerindeki etkiyi özetleyen bir matematiksel formül vardır.

Ayrıca tıpkı tamircinin otomobilinizin tamirinin toplamda kaça mal olacağı sorusuna karşılık, başta 900 dolar olarak tahmin ettiği fatura tutarını, 50, 27, 10 ve 0,93 dolar ekleyerek düzeltmesinde olduğu gibi, tıpkı Dünyanın hareketini anlama çabamızda, Güneş'in etkisini Ay ve öbür gezegenlerin daha küçük orandaki etkilerini de işin içine dahil ederek düzeltmemizin bizi daha kesin bir anlayışa ulaştırmasında olduğu gibi; sicim kuramcıları da, iki sicim arasındaki etkileşimi hiç ilmek bulunmayan (sanal sicim çiftlerinin olmadığı) şemaya, tek ilmekli şemaya (tek bir sanal sicim çifti), iki ilmekli şemaya (iki sanal sicim çifti) vs. tekabül eden matematiksel ifadeleri. Şekil 12.6'da gösterildiği gibi birbirine ekleyerek anlayabileceğimizi göstermişlerdir.



Şekil 12.5 Kuantum çılgınlığı, çok sayıda sicim/antisicim çifti dizisinin ortaya çıkmasına ve ortadan kalkmasına neden olabilir.

Kesin bir hesaplama, bu şemaların her biriyle ilişkili matematiksel ifadeleri birbirine eklememizi gerektirir; şemaların her birinde ilmek sayısı artacaktır. Fakat bu şemalar sonsuz sayıda olduğundan ve her biriyle ilişkilendirilen matematiksel hesaplar ilmek sayısı arttıkça giderek zorlaştığından bu imkânsız bir iştir. Sicim kuramcıları bu hesapları sıfır ilmekli süreçlerin makul bir yaklaşık değer tahmini vereceği, ilmek sayısı arttıkça ilmek şemalarının giderek küçülen düzeltmelere yol açacağı beklentisine dayanan bir tedirginlik çerçevesi içine yerleştirmişlerdir.



Şekil 12.6 Gelen her bir sicimin diğeri üzerindeki net etkisi, Çok daha fazla sayıda il mekli şemaları içeren etkilerin birbirine eklenmesinden gelir.

Aslına bakarsanız, sicim kuramı hakkında bildiğimiz her şey -önceki bölümlerde anlattığımız malzemenin büyük bölümü- bu tedirginlik yaklaşımını kullanarak ayrıntılı ve incelikli hesaplar gerçekleştiren fizikçiler tarafından keşfedilmiştir. Fakat bulunan sonuçların geçerliliğine güvenebilmemiz için, Şekil 12.6'da-ki ilk birkaç şema dışında, her şeyi görmezden gelen yaklaşık olduğu varsayılan değer tahminlerinin gerçekten yaklaşık olup olmadığını belirlememiz gerekir. Bu da bizi o kritik soruya götürüyor: Yaklaşıklık içinde miyiz?

Yaklaşık Değer Yaklaşık mı?

Değişir. Şemaların her biriyle ilişkilendirilen matematiksel formül ilmek sayısı arttıkça daha karmaşıklaştığından, sicim kuramcıları temel bir özelliğin farkına varmışlardır. Bir ipin sağlamlığının, ipin kuvvetli bir çekme ve sarsma sonucu koparak iki parçaya ayrılıp ayrılmayacağını belirlemesinde olduğu gibi, kuantum dalgalanmalarının tek bir sicimin iki parçaya ayrılmasına, bir anda sanal bir çiftin ortaya çıkmasına neden olup olmayacağını belirleyen bir rakam vardır. Bu rakam sicim eşleşme sabiti olarak bilinir (daha açık konuşacak olursak, kısa bir süre sonra tartışacağımız gibi beş sicim kuramının her birinin farklı bir sicim eşleşme sabiti vardır). Bu isim hayli tanımlayıcıdır: Sicim eşleşme sabitinin büyüklüğü, üç sicimin (ilk ilmek ile ayrıldığı iki sanal ilmek) kuantum çalkalanmalarının birbirleriyle ne kadar güçlü bir ilişki içinde olduğunu betimler; deyim yerindeyse birbirleriyle ne derece sıkı *eşleştiklerini* betimler. Hesaplamaların biçimine göre, sicim eşleşme

sabiti ne kadar büyükse kuantum çalkalanmalarının bir ilk sicimin ayrılmasına (sonra tekrar birleşmesine) yol açma ihtimali de o kadar büyüktür; sicim eşleşme sabiti ne kadar küçükse, bu tür sanal sicimlerin bir anlığına var olmaları ihtimali de o kadar düşüktür.

Beş sicim kuramının herhangi birindeki sicim eşleşme sabitinin değerini belirleme sorusunu kısaca ele alacağız, ama önce bu sabitin büyüklüğünü değerlendirirken "küçük" veya "büyük" demekle aslında ne demek istiyoruz ona bakalım. Sicim kuramının temelindeki matematik, "küçük" ile "büyük" arasındaki sınırın 1 rakamı olduğunu göstermektedir. Sicim eşleşme sabitinin değeri 1'den küçükse, bu durumda -birden fazla sayıda şimşek çakmasında olduğu gibi- çok fazla sayıda sicim çiftinin bir anlığına varlık bulması giderek ihtimal dışı olacaktır. Fakat eşleşme sabitinin değeri 1 ise ya da 1'den büyükse, bu tür sanal çiftlerin daha fazla sayıda sahneye çıkması daha muhtemeldir. Mesele şudur: Sicim eşleşme sabiti 1'den küçük olursa, ilmek sayıları arttıkça, ilmek şemalarının katkıları giderek azalır. Tedirginlik yaklaşımı için gereken de budur işte, çünkü bu yaklaşım, birkaç ilmekli süreçler hariç bütün süreçleri görmezden gelsek dahi makul derecede geçerli sonuçlar elde edeceğimizi göstermektedir. Fakat sicim eşleşme sabiti 1'den küçük değilse, ilmek sayısı arttığından ilmek şeması katkıları giderek daha önemli hale gelir. Üçlü yıldız sistemimizde olduğu gibi, bu da tedirginlik yaklaşımını geçersiz kılar. Varsayılan yaklaşık değer -hiç ilmek bulunmayan süreç- yaklaşık *değildir.* (Bu tartışma, beş sicim kuramının beşi için de aynı derecede geçerlidir; bir sicim kuramındaki sicim eşleşme sabitinin değeri, tedirginlik yaklaşımı şemasının etkililiğini belirler.)

Bu kavrayış bizi bir sonraki kritik soruya götürüyor: Sicim eşleşme sabitinin değeri nedir? (Daha açık bir deyişle beş sicim kuramının her birinde sicim eşleşme sabitlerinin değerleri nedir?) *Halihazırda hiç kimse bu soruyu cevaplayabilir durumda değildir.* Bu mesele sicim kuramının çözülmemiş en önemli meselelerinden biridir. Bir tedirginlik kuramı çerçevesine dayanan sonuçların, ancak ve ancak sicim eşleşme sabitinin 1'den küçük olması halinde haklı çıkacağından emin olabiliriz. Ayrıca sicim eşleşme sabitinin kesin

değerinin, çeşitli sicim titreşim örüntülerinin taşıdığı kütleler ve yükler üzerinde de doğrudan bir etkisi vardır. Nitekim fiziğin büyük bölümünün sicim eşleşme sabitinin değerine dayandığını görüyoruz. Bu yüzden de gelin, eşleşme sabitinin değeriyle -beş sicim kuramının herhangi birindeki değer- ilgili önemli sorunun neden hâlâ cevaplanmamış olduğuna yakından bakalım.

Sicim Kuramı Denklemleri

Sicimlerin birbirleriyle nasıl bir etkileşim içinde olduğunu belirlemeye yönelik tedirginlik yaklaşımı, sicim kuramının temel denklemlerini belirlemek için de kullanılabilir. Esasen sicim kuramı denklemleri, sicimlerin nasıl etkileşim kurduğunu belirler, tersinden söyleyecek olursak, sicimlerin birbirleriyle etkileşme biçimleri, kuramın denklemlerini doğrudan belirler.

İlk örnek olarak, beş sicim kuramının her birinde kuramın eşleşme sabitinin değerini belirlemeye yarayan bir denklem bulunduğunu belirtelim. Fakat fizikçiler bugün, az sayıda ilgili sicim şemasını tedirginlik yaklaşımıyla matematiksel olarak değerlendirerek, beş kuramın her biri için bu denklemin ancak yaklaşığını bulabilmişlerdir. Yaklaşık denklem şöyle söyler: Beş sicim kuramının herhangi birinde, sicim eşleşme sabiti öyle bir değer alır ki, sıfırla çarpıldığında sonuç sıfır verecektir. Müthiş bir hayal kırıklığı yaratan bir denklemdir bu, çünkü hangi sayıyı sıfırla çarparsanız çarpın sıfır sonucuna varırsınız. Nitekim beş sicim kuramının her birinde de, sicim eşleşme sabitiyle ilgili yaklaşık denklem bize bu sabitin değeri hakkında hiçbir şey söylemez.

Yeri gelmişken, beş sicim kuramının her birinde, hem uzamış hem de kıvrılmış uzay-zaman boyutlarının kesin biçimini belirlediği varsayılan başka bir denklem de vardır. Bu denklemin bugün elimizde bulunan yaklaşık versiyonu, sicim eşleşme sabitinin değeriyle ilgili denklemden çok daha sınırlıdır, yine de çok sayıda çözümü mümkün kılmaktadır. Örneğin, uzamış dört uzay-zaman boyutu, kıvrılmış 6 boyutlu bir Calabi-Yau uzayıyla birlikte bir sürü çözüme kapı açar, fakat bu bile olasılıkları tüketmemektedir;

olasılıklar uzamış ve kıvrılmış boyutların sayısı arasında farklı bir bölünmeyi de mümkün kılmaktadır." Peki bu sonuçlarla nereye varabiliriz? Üç olasılık bulunuyor. Öncelikle, en karamsar olasılıktan yola çıkalım; sicim kuramlarının her biri, kuramın eşleşme sabitinin yanı sıra, uzay-zamanın boyutlarını ve kesin geometrik biçimini belirlemeye -başka hiçbir kuram böyle bir iddiada bulunamaz- yarayan denklemlerle donanmış olsa da, bu denklemlerin henüz bilinmeyen kesin biçimi geniş bir çözüm yelpazesini mümkün kılabilir, ki bu da kuramın tahmin yürütme gücünü ciddi biçimde zayıflatacaktır. Bu doğruysa eğer, bir geri adım olacaktır; çünkü sicim kuramı kozmosun bu özelliklerini açıklayacağı vaadinde bulunur; bizim deneysel gözlemlerde bulunarak bunları belirlememizi, az çok keyfi biçimde bunları kurama katmamızı gerektirmeyecektir. Bu olasılığa XV. Bölüm'de döneceğiz. İkincisi, yaklaşık sicim denklemlerindeki istenmeyen esneklik, akıl yürütmemizdeki ince bir kusurun göstergesi olabilir. Sicim eşleşme sabitinin değerini belirlerken tedirginlik yaklaşımını kullanma girişiminde bulunuyoruz. Fakat daha önce de tartışmış olduğumuz gibi, tedirginlik yöntemleri, ancak ve ancak eşleşme sabiti 1'den küçükse anlamlıdır, dolayısıyla hesaplamamız cevabı hakkında haklılığı geçerlilik kazanmamış bir varsayımda bulunuyor olabilir; açıkçası cevabın 1'den küçük olacağını söylüyor olabilir. Yanılgımız pekâlâ bu varsayımın yanlış olduğunu, beş sicim kuramının herhangi birindeki eşleşme sabitinin 1'den büyük olduğunu gösteriyor olabilir. Üçüncüsü, istenmeyen esneklik, sırf kesin denklemler yerine yaklaşık denklemler kullanıyor olmamızdan da kaynaklanıyor olabilir. Örneğin, bir sicim kuramındaki eşleşme sabiti 1'den küçük olabilse de, kuramın denklemleri *bütün* şemaların katkılarına hassas bir biçimde dayanıyor olabilir yine de. Yani, daha fazla sayıda ilmeğe sahip şemalara dayalı küçük düzeltmelerinin toplamı, yaklaşık denklemleri -birçok çözümü mümkün kılarlar- değiştirip daha kısıtlayıcı kesin denklemler haline getirmemiz açısından elzem olabilir.

1990'ların başında, bahsettiğimiz bu son iki olasılık, tamamen tedirginlik yaklaşımına dayanmanın ilerleme yolunu tıkadığını sicim kuramcılarının çoğuna açıkça göstermişti. Alanda çalışan çoğu insanın hemfikir olduğu üzere, bundan sonraki büyük atılım,

tedirginlik yaklaşımına dayanmayan bir yaklaşımı gerektirecektir; yaklaşık hesaplama tekniklerine ayrılmayan, dolayısıyla tedirginlik çerçevesinin ötesine geçebilecek bir yaklaşımı. 1994'te, böyle bir yol bulmak, kafamız dumanlı olduğunda dalınan hayallerden biriymiş gibi görünüyordu. Ne var ki bazen böyle hayaller gerçeğe dönüşür.

İkilik

Dünyanın dört bir yanından sicim kuramcıları her yıl, bir önceki yıl varılan sonuçların özetlenmesini, olası araştırma yönlerinin göreli yararının değerlendirilmesini amaçlayan bir konferansta bir araya gelir. Belli bir yıl kaydedilmiş ilerleme durumuna bakılarak, katılımcılar arasındaki ilgi ve heyecan düzeyine dair tahminde bulunulabilir. 1980'lerin ortalarında, ilk süpersicim devriminin şaşaalı döneminde, toplantılara dizginlerinden boşanmış bir coşku hâkim olurdu. Fizikçilerin büyük bölümü, sicim kuramını kısa süre içinde tam anlamıyla anlayacakları, sicim kuramının evrenin nihai kuramı olduğunu açıklayacakları umudu içindeydi. Geriye dönüp bakınca naifçe bir umut olduğunu söyleyebiliriz. Aradan geçen yıllar, sicim kuramının, anlaşılması uzun ve meşakkatli bir çalışmayı gerektireceği su götürmeyen birçok derin ve ince veçhesi olduğunu göstermiştir, ilk zamanların gerçekçi olmayan beklentileri bir geri tepmeyle sonuçlanmıştı; her şeyin hemen yerli yerine oturmaması birçok araştırmacıyı yılgınlığa sürüklemişti. 1980'lerin sonlarındaki sicim konferansları, düşük seviyede bir hayal kırıklığını yansıtıyordu: Fizikçiler ilginç sonuçlar sunuyorlardı, fakat atmosfer heyecandan yoksundu. Hatta bazıları, camianın her yıl sicim konferansları düzenlemeye bir son vermesi gerektiğini ileri sürüyordu. Fakat 1990'ların başında işler düzeldi. Bazılarını önceki bölümlerde tartıştığımız çeşitli atılımlar sayesinde, sicim kuramı yeniden gücünü topluyor, araştırmacılar yeniden heyecan ve iyimserlik kazanıyordu. Fakat Mart 1995'te Güney California Üniversitesi'nde olacakları haber veren pek bir şey yoktu.

Edward Witten, kendisine ayrılan bir saatlik süre için sıra ona geldiğinde kürsüye yürüdü ve ikinci süpersicim devrimini başlatan bir konuşma yaptı. Duff, Hull ve Townsend'in daha önce yaptığı

çalışmalardan esinlenen, Schwarz, Hint fizikçi Ashok Sen ve diğerlerinin görüşlerinden yararlanan Witten, sicim kuramının tedirginlik yaklaşımıyla anlaşılmasını aşan bir strateji sundu. Planın ana kısmını *ikilik* kavramı oluşturuyordu.

Fizikçiler ikilik terimini, birbirinden farklıymış gibi görünen, fakat yine de kesinlikle aynı fiziği betimledikleri gösterilebilecek olan kuramsal modelleri ifade etmek için kullanırlar. Görünürde birbirinden farklı kuramların aslında aynı olduğu, sadece ve sadece sunulma tarzları yüzünden farklı göründükleri "önemsiz" ikilik örnekleri vardır. Yalnızca İngilizce bilen birine genel görelilik Çince anlatılırsa, başta Einstein'ın kuramı olan o genel görelilik gibi gelmeyebilir. Fakat her iki dile de hâkim olan bir fizikçi, kolayca bir dilden diğerine tercüme yapıp iki kuramın da eşdeğer olduğunu gösterebilir. Bu örneğe "önemsiz" deriz, çünkü fiziğin bakış açısına göre böyle bir tercümenin kazandırdığı bir şey yoktur. Hem İngilizceye hem Çinceye hâkim olan biri genel görelilikte zor bir problem üzerinde çalışıyor olsaydı, ifade etmek için hangi dili kullanırsa kullansın uğraştığı problem aynı derecede zor olacaktı. İngilizceden Çinceye geçmek ya da Çinceden İngilizceye geçmek fiziksel açıdan yeni bir kavrayış getirmez.

Önemsiz olmayan ikilik örnekleri, aynı fiziksel duruma dair farklı tanımların farklı ve birbirini tamamlayıcı fiziksel kavrayışları ve matematiksel analiz yöntemlerini beraberinde getirdiği örneklerdir. Aslına bakarsanız, iki tane ikilik örneğiyle karşılaşmış bulunuyoruz zaten. X. Bölüm'de, sicim kuramının Rya-rıçapında dairesel bir boyutu olan bir evren ile 1/R yarıçapında dairesel bir boyuta sahip bir evreni nasıl aynı derecede iyi tanımlayabileceğini tartışmıştık. Bunlar sicim kuramının özellikleri sayesinde aslında fiziksel olarak aynı olan farklı geometrik durumlardır. Ayna simetrisi de ikinci bir örnektir. Burada 6 boyutlu iki farklı Calabi-Yau şekli -ilk bakışta tümüyle farklı görünen evrenler- kesinlikle aynı fiziksel özellikleri beraberinde getirmektedir. Bunlar tek bir evrene dair iki betimleme sunmaktadır. Burada önemli nokta şudur ki, İngilizceden Çinceye çeviri yapma örneğindeki durumun tersine, bu iki tanımı kullanmamızı mantıken izleyecek olan önemli fiziksel kavrayışlar *vardır,* dairesel boyutların

minimum büyüklüğü ve sicim kuramında topoloji değiştiren süreçler gibi.

Witten, Sicim 95 Konferansı'nda yaptığı konuşmada, yeni ve köklü bir ikiliğin kanıtlarını sunmuştu. Bu bölümün başında kısaca özetlediğimiz üzere, temel yapıları görünürde farklı olsa da, beş sicim kuramının, temelde aynı olan fiziği tanımlamanın farklı yollarından ibaret olduğunu ileri sürmüştü. Bu durumda, elimizde beş farklı sicim kuramı yerine, temeldeki bu tek kuramsal çerçeveye açılan beş farklı penceremiz olacaktır.

1990'lardaki gelişmeler yaşanmadan önce, böylesine büyük bir ikilik, fizikçilerin sığınabileceği, fakat çok uzak göründüğünden hakkında nadiren konuştukları temennilerden biriydi. İki sicim kuramı yapılarındaki önemli farklar nedeniyle birbirinden farklıysa eğer, nasıl olup da aynı temel fiziğin farklı betimlemeleri olabileceklerini tahayyül etmek zordur. Yine de sicim kuramının ince kuvveti sayesinde, beş sicim kuramının da ikili olduğu yönünde artan kanıtlar mevcuttur. Dahası birazdan tartışacağımız üzere Witten, altıncı bir kuramın daha aynı kazana karıştığı yönünde kanıtlar sunmuştur.

Bu gelişmeler, geçen kısmın sonunda karşımıza çıkan tedirginlik yöntemlerinin uygulanabilirliğiyle ilgili meselelerle iç içe geçmiştir. Sebep, beş sicim kuramının her birinin bir diğeriyle zayıf bir biçimde eşleştirildiğinde -kuramın eşleşme sabitinin 1'den küçük olduğu anlamına gelen mesleki bir terimdir bu-açıkça birbirlerinden farklı olmasıdır. Fizikçiler, tedirginlik yöntemlerine dayandıklarından, herhangi bir sicim kuramının eşleşme sabitinin 1'den büyük olması halinde *-güçlü eşleştirme* denilen terim- kuramın hangi özelliklere sahip olacağı sorusunu bir süre cevaplayamamışlardır. Birazdan tartışacağımız üzere, Witten ile diğerlerinin iddiası, bu önemli sorunun artık cevaplanabileceği yönündedir. Vardıkları sonuçlar ikna edici bir biçimde, birazdan tanımlayacağımız altıncı bir kuramla birlikte, bu kuramlardan herhangi birindeki güçlü eşleşme tutumunun bir diğerindeki zayıf eşleşme tutumuyla ikili bir betimlemeye sahip olduğunu, aynı şekilde tersinin de geçerli olduğunu ileri sürmektedir.

Bunun ne anlama geldiğini daha somut bir biçimde anlayabilmek için, şu benzetmeyi aklınızda tutmak isteyebilirsiniz. İki birey düşünün. Biri buzu seviyor, ama tuhaftır hayatında hiç su görmemiş (suyun sıvı halini). Diğeriyse su seviyor, fakat yine tuhaftır, hayatında hiç buz görmemiş. Şans eseri tanışıp çölde bir kamp gezisine çıkmayı kararlaştırıyorlar. Yola koyulduklarında, ikisi de diğerinin yanında getirdiklerinin büyüsüne kapılıyor. Buz âşığı, su âşığının ipeksi yumuşaklıktaki şeffaf sıvısına hayran oluyor, su âşığıysa tuhaf bir biçimde buz âşığının yanında getirdiği o dikkat çekici katı kristal küplere kaptırıyor kendini. Su ile buz arasında aslında derin bir ilişki olduğuna dair bir fikri yok ikisinin de; onlara göre su ile buz tümüyle farklı iki madde. Fakat çölün kavurucu sıcağında, buzun yavaş yavaş suya dönüşmesi karşısında şok oluyorlar. Çöl gecelerinin dondurucu soğuğunda da sıvı suyun yavaş yavaş buza dönüşmesi de onları yine hayrete düşürüyor. Başta, birbiriyle hiç ilişkisi olmadığını düşündükleri bu iki maddenin yakından bağlantılı olduğunu fark ediyorlar.

Beş sicim kuramı arasındaki ikilik de biraz buna benzer: Kabaca söyleyecek olursak, sicim eşleşme sabitleri çöl benzetmemizde sıcaklığın oynadığı role benzer bir rol oynar. Tıpkı su ve buz gibi, beş sicim kuramından herhangi ikisi ilk bakışta birbirinden tümüyle farklı görünür. Fakat eşleşme sabitlerini değiştirirsek, kuramlar kendi içlerinde dönüşmeye başlar. Tıpkı sıcaklığını artırdığımızda buzun suya dönüşmesinde olduğu gibi, eşleşme sabitinin değerini artırdığımızda bir sicim kuramı da bir diğerine dönüşebilir. Bu da bütün sicim kuramlarının, temeldeki tek biryapının -su ve buz için H_2O neyse o- ikili tanımları olduğunu gösterme yolunda büyük bir mesafe kat etmemizi sağlıyor.

Bu sonuçların gerisindeki mantık, neredeyse tümüyle simetri ilkelerine kök salmış savların kullanılmasına dayanır. Gelin bunu tartışalım.

Simetrinin Kuvveti

Yıllarca, hiç kimse beş sicim kuramından herhangi birinin sicim eşleşme sabitine daha büyük değerler verilmesi halinde ne tür özellikler göstereceğini inceleme girişiminde dahi bulunmadı, çünkü tedirginlik çerçevesi olmaksızın nasıl ilerleneceği konusunda hiç kimsenin fikri yoktu. Fakat 1980'lerin sonunda ve 1990'ların başında, fizikçiler belli bir sicim kuramının güçlü eşleşme fiziğinin bir parçası olan, yine de hesaplama yetimiz içinde kalan bazı özel yönlerin—belli kütlelerin ve güç boşalımlarının—tanımlanması konusunda yavaş ama istikrarlı bir ilerleme kaydetti. Tedirginlik çerçevesini kesinlikle aşan bir iş olan bu özelliklerin hesaplanması, ikinci süpersicim devriminin ilerlemesinin itici gücü olma konusunda temel bir rol oynamıştır ve simetrinin kuvvetine de sıkı sıkıya bağlıdır.

Simetri ilkeleri, fiziksel dünya hakkında birçok şeyin anlaşılması konusunda derinlikli kavrayışa götüren araçlar sunarlar. Örneğin fizik yasalarının, evrendeki herhangi bir yere ya da zamandaki herhangi bir ana özel bir muamele göstermediğini, bu gayet sıkı desteklenen inancın da burada ve şimdiye hükmeden yasaların heryerde ve her zaman hüküm süren yasalarla aynı olduğunu savunmamızı mümkün kıldığını tartışmıştık. Bu büyük bir örnektir, fakat simetri ilkeleri, o kadar kapsayıcı olmayan koşullarda da aynı derecede önemli olabilir. Diyelim ki bir suça tanık oldunuz, fakat failin yüzünü yalnızca sağ tarafından göz ucuyla gördünüz, bir polis ressamı yüzün tamamını çizmek için bu bilgiyi yine de kullanabilir. Sebebi simetridir. Bir insan yüzünün sol ve sağ tarafları arasında farklılıklar bulunsa da, çoğu yüz, bir tarafına dair iyi bir yaklaşıklık kurmak için diğer tarafın görüntüsünün kullanılmasını mümkün kılacak kadar simetriktir.

Birbirinden son derece farklı bu uygulamaların her birinde simetrinin kuvveti, özellikleri *dolaylı* bir tarzda kavrama yetişidir; bu genellikle, doğrudan bir yaklaşımdan çok daha kolaydır. Andromeda galaksisinde geçerli temel fiziği, oraya gidip bir yıldızın etrafında dönen bir gezegen bulup, hızlandırıcılar inşa edip dünyada gerçekleştirdiğimiz türden deneyleri orada gerçekleştirerek öğrenebiliriz. Fakat yerel farklılıklar dikkate alınarak simetrinin dolaylı yaklaşımını uygulamak çok daha kolaydır. Failin yüzünün sol tarafının özelliklerini onu yakalayıp inceleyerek de öğrenebiliriz.

Fakat yüzdeki sol-sağ simetrisini kullanmak genellikle çok daha kolaydır.’

Süpersimetri, farklı miktarlarda spinlere sahip olan temel bileşenlerin fiziksel özelliklerini ilişkilendiren daha soyut bir simetri ilkesidir. En iyi ihtimalle elimizde, mikrodünyanın böyle bir simetri içerdiği yönünde deneysel sonuçların sunduğu ipuçları vardır, fakat daha önce tartıştığımız sebeplerden ötürü, süpersimetrinin var olduğu yönünde kuvvetli bir inanç bulunmaktadır. Süpersimetri, sicim kuramının kesinlikle ayrılmaz bir parçasıdır. 1990'larda, İleri Araştırmalar Enstitüsü'nden Nathan Seiberg'in öncü çalışmasının liderliğinde fizikçiler, süpersimetrinin çok zor ve önemli bazı soruları dolaylı yoldan cevaplayabilecek keskin ve nüfuz edici bir araç olduğunu anlamışlardı.

Bir kuramın ince detaylarını anlamamış olsak dahi, kuramın süpersimetri içerdiği olgusu sahip olabileceği özelliklere ciddi sınırlamalar getirmemize izin verir. Dilsel bir benzetme kullanalım: Küçük bir kâğıda belli bir harf dizisinin yazıldığını düşünün, içinde *"y"* harfi tam olarak üç kez geçiyor ve kâğıt mühürlü bir zarfın içine konuluyor. Başka bir bilgi verilmezse, diziyi tahmin etme imkânımız olmaz; çünkü tek bildiğimiz, dizinin, içinde üç *"y"* geçen *mvcfojziyxidqfqzyycdi* gibi rasgele bir harf topluluğu olabileceği gibi sonsuz sayıdaki başka olasılıklardan biri de olabileceğidir. Fakat diyelim ki, iki ipucu daha verildi: Gizli harf dizisi İngilizce bir sözcük ve içinde üç *"y"* geçen en kısa sözcük. Başta elimizde sonsuz sayıda harf dizisi olasılığı bulunurken, bu ipuçları olasılıkları tek bir sözcüğe, içinde üç *"y"* geçen en kısa İngilizce sözcüğe indirir: *Syzygy.*

Süpersimetri, simetri ilkelerini içeren kuramlar için benzer kısıtlayıcı ipuçları getirir. Bunu biraz anlayabilmek için, önümüze biraz önce anlattığımız dil bulmacasına benzer bir fizik bulmacası konduğunu düşünelim. Bir kutunun içine saklanmış, belli bir kuvvet yüküne sahip bir şey var; ne olduğu söylenmiyor. Yük, elektrik yükü olabilir, manyetik yük olabilir ya da başka genellemelerden biri olabilir, ama açık olalım ve diyelim ki üç birim elektrik yükü var. Elimizde daha fazla bilgi olmadan kutunun içinde ne olduğunu

belirleyemeyiz. Pozitronlar ya da protonlar gibi kuvvet yükü 1 olan üç parçacık olabilir; kuvvet yükü 1 olan dört parçacıkla, kuvvet yükü -1 olan bir parçacık (elektron gibi) olabilir, bu kombinasyonun da kuvvet yükü net üçtür; 1/3 yüklü dokuz parçacık (yukarı kuark gibi) olabileceği gibi aynı dokuz parçacığın yanında herhangi bir sayıda yüksüz parçacıklar (fotonlar gibi) da bulunabilir. Elimizde sadece üç "y"li ipucu varken olduğu gibi, kutunun içinde olabileceklere dair de olasılıklar sınırsızdır.

Ama diyelim ki, dil bulmacamızda olduğu gibi iki ipucu daha veriliyor. Dünyayı -dolayısıyla kutunun içindekileri- betimleyen kuramın süpersimetrik olduğu, kutunun içindekilerin de toplam elektrik yükünün üç birim olduğunu söyleyen ilk ipucuyla tutarlı olarak *en az kütleye* sahip olması gerektiği söyleniyor. Fizikçiler E. Bogomoln'yi, Manoj Prasad ve Charles Sommerfeld'in görüşlerine dayanarak, sıkı işlevsel bir çerçevenin (süpersimetri çerçevesi, İngilizce benzetmesinde olduğu gibi) bu şekilde belirtilmesinin ve bir "en az sınırlaması" getirilmesinin (belli bir elektrikyükü için en az kütle, belli sayıday için en kısa sözcük benzetmesinde olduğu gibi) kutunun içinde saklı olanların kimliğinin *benzersiz biçimde* sabitlendiği anlamına geldiğini göstermişlerdir. Yani fizikçiler, kutunun içindekinin olabildiğince hafif olması ve yine de belirtilen yüke sahip olması durumunda, ne olduğunun tam anlamıyla tespit edilebileceğini göstermişlerdir. Belli bir yük değeri için en az kütlenin bileşenleri, onları keşfeden üç fizikçinin adlarıyla BPS halleri olarak bilinir.

BPS halleriyle ilgili önemli nokta şudur: Özellikleri tedirginlik hesaplamasına başvurmaksızın, emsalsiz bir biçimde, kolayca ve kesinlikle belirlenebilir. Bu durum, eşleşme sabitlerinin değerinden bağımsız olarak geçerlidir. Yani sicim eşleşme sabitinin büyük olması, bu durumda tedirginlik yaklaşımının geçersiz olması halinde dahi, BPS konfigürasyonlarının kesin değerini çıkartabiliriz yine de. Bu özelliklere genellikle *tedirgin olmayan* kütleler ve yükler denir, çünkü değerleri tedirgin yaklaşıklık şemasını aşar. Bu yüzden BPS'nin "Beyond Perturbative States" (tedirgin hallerin ötesi) anlamına geldiğini de düşünebilirsiniz.

BPS özellikleri, eşleşme sabitinin büyük olması halinde, belli bir sicim kuramına özgü fiziğin ancak küçük bir kısmını inceleyebilirler, ama yine de kuramın bazı güçlü eşleşme özelliklerini somut bir biçimde anlamamızı sağlarlar. Seçilmiş bir sicim kuramında eşleşme sabiti artar ve tedirginlik kuramının erişebileceği alanın ötesine geçerse, sınırlı kavrayışımızı, BPS hallerine demir atarız. Yabancı bir dildeki birkaç seçilmiş sözcük gibi, bu hallerin de bizi hayli uzaklara götüreceğini göreceğiz.

Sicim Kuramında ikilik

Witten'ı izleyerek, beş sicim kuramından biriyle, diyelim ki Tip I sicimle yola çıkalım ve kuramdaki dokuz uzay boyutunun dokuzunun da düz ve kıvrımsız olduğunu düşünelim. Elbette ki bu hiç gerçekçi değil, ama tartışmayı daha basitleştiriyor; kıvrılmış boyutlara birazdan döneceğiz. Sicim eşleşme sabitinin 1'den çok daha az olduğunu varsayarak başlayalım. Bu durumda tedirginlik araçları geçerlidir, dolayısıyla kuramın birçok ayrıntılı özelliği doğru olarak ortaya çıkarılabilir, çıkarılmıştır. Eşleşme sabitinin değerini artırıp yine de 1'den epeyce az tuttuğumuzda da, tedirginlik yaklaşımları kullanılabilir. Kuramın ayrıntılı özellikleri biraz değişecektir -örneğin, bir sicimin bir diğerinden ayrılmasıyla ilişkilendirilen sayısal değerler biraz farklı olacaktır, çünkü Şekil 12.6'daki çoklu ilmek süreçleri eşleşme sabiti arttığında daha büyük katkılarda bulunur. Fakat ayrıntılı sayısal özelliklerdeki bu değişikliklerin ötesinde, eşleşme sabiti tedirginlik araçlarının alanında kaldığı sürece kuramın genel fiziksel içeriği de değişmeden kalır.

Tip I sicim eşleşme sabitini, 1 değerinin ötesinde artırırsak, tedirginlik yöntemleri geçersiz hale gelecektir, bu yüzden sadece sınırlı bir küme olan, hâlâ anlama yetimiz dahilinde yer alan tedirgin olmayan kütleler ve yükler kümesine -BPS hallerine-odaklanacağız. Witten'ın ortaya attığı, daha sonra Santa Barba-ra'da California Üniversitesi'nden Joe Polchinski'nin doğruladığı sav şudur: Tip I sicim kuramının güçlü eşleşme özellikleri, ancak Eleterotik-O sicim kuramının sicim eşleşme değerinin küçük olması koşuluyla bu kuramın bilinen özellikleriyle tam olarak uyuşur. Yani Tip I sicimin

eşleşme sabiti büyükse, nasıl ulaşacağımızı bildiğimiz kütleler ve yükler, eşleşme sabitinin küçük olması halinde Eleterotik-O sicim kuramındaki kütleler ve yüklerle tam olarak aynıdır. Bu da, ilk bakışta su ve buz gibi birbirinden tümüyle farklı görünen bu iki sicim kuramının aslında ikili olduğu yönünde güçlü bir işaret sunuyor. Eşleşme sabitinin büyük değerlerde olması halinde Tip I kuramı fiziğinin, eşleşme sabitinin küçük değerlerde olması halinde Eleterotik-O kuramı fiziğiyle *aynı* olduğunu inandırıcı bir biçimde ileri sürüyor. Ve tersinin de doğru olduğu yönünde ikna edici kanıtlar var: Eşleşme sabitinin küçük değerlerde olduğu durumlardaki Tip I kuramı fiziği, eşleşme sabitinin büyük olduğu durumlardaki Heterotik-O kuramı fiziğiyle aynıdır.' Bu iki sicim kuramı, tedirgin yaklaşıklık şeması kullanılarak analiz edildiğinde birbiriyle hiç ilişkisi yokmuş gibi görünse de, eşleşme sabitlerinin değeri değiştiğinde birinin diğerine dönüştüğünü görüyoruz; su ile buz arasındaki dönüşümü andırıyor biraz.

Bu yeni sonuç, bir kuramın güçlü eşleşme fiziğinin, bir diğerinin zayıf eşleşme fiziğiyle betimlenmesi, *güçlü-zayıf ikiliği* olarak bilinir. Daha önce tartıştığımız diğer ikiliklerde olduğu gibi, bu ikilik de söz konusu iki kuramın aslında birbirinden farklı olmadığını söyler bize. Bu kuramlar daha çok, aynı temel kuramın birbirinden farklı iki betimlemesini sunmaktadırlar. İngilizce-Çince tercüme örneğindeki önemsiz ikiliğin tersine, güçlü-zayıf eşleşme ikiliği kuvvetlidir. İkili bir kuram çiftinde, kuramlardan birinin eşleşme sabiti küçükse, kuramın fiziksel özelliklerini iyi geliştirilmiş tedirginlik araçları kullanarak analiz edebiliriz. Fakat kuramın eşleşme sabiti büyükse, dolayısıyla tedirginlik yöntemleri işe yaramıyorsa, artık ikili betimlemeyi -ilgili eşleşme sabitinin küçük olduğu betimlemeyi- kullanabileceğimizi, geri dönüp tedirginlik araçlarına başvurabileceğimizi biliyoruz. Bu tercüme, başta kuramsal yetimizin ötesinde olduğunu düşündüğümüz bir kuramı analiz etmeye yönelik niceliksel yöntemlere sahip olmamızla sonuçlanmıştır.

Aslında, Tip I sicim kuramındaki güçlü eşleşme fiziğinin, Eleterotik-O kuramındaki zayıf eşleşme fiziğiyle aynı olduğunu kanıtlamak, henüz başarılamamış son derece zor bir iştir. Bunun sebebi basittir.

İkili olduğu varsayılan kuram çiftindeki kuramlardan biri, eşleşme sabiti çok büyük olduğu için tedirginlik yaklaşımıyla analiz edilmeye uygun değildir. Bu da birçok fiziksel özelliğinin doğrudan hesaplanmasını engeller. Aslına bakarsanız, varsayılan ikiliği bu kadar güçlü kılan şey tam da budur, çünkü bu doğruysa eğer, güçlü eşleşmeye sahip kuramın analizi için yeni bir araç ortaya koyacaktır, bu araç: Zayıf eşleşmeye sahip diğer betimleme üzerinde tedirginlik yöntemlerinin kullanılmasıdır.

Fakat iki kuramın ikili olduğunu kanıtlayamasak dahi, kendimizden emin bir halde *çıkartabildiğimiz* özellikler arasındaki mükemmel uyum, Tip I ve Heterotik-O sicim kuramları arasındaki varsayılan güçlü-zayıf ilişkisinin doğru olduğu yönünde son derece ikna edici kanıtlar ortaya koyar. Aslına bakarsanız, varsayılan ikiliği sınamak için gerçekleştirilen daha akıllıca hesapların hepsi de olumlu sonuçlar vermiştir. Sicim kuramcılarının çoğu ikiliğin doğru olduğuna ikna olmuştur.

Aynı yaklaşımı izleyerek geri kalan sicim kuramlarından bir diğerinin, diyelim ki Tip IIB kuramının güçlü eşleşme özelliklerini de inceleyebiliriz. İlk olarak Hull ile Townsend'in varsaydığı, birçok fizikçinin araştırmalarıyla da desteklendiği üzere, aynı derecede dikkat çekici bir şey ortaya çıkıyormuş gibi görünmektedir. Tip IIB sicim kuramının eşleşme sabiti büyürken hâlâ anlayabildiğimiz fiziksel özellikler, Tip IIB sicim kuramının zayıf eşleşme durumundaki özelliklerine tam olarak uyuyormuş gibi görünmektedir. Başka bir deyişle, Tip IIB sicim kuramı *kendinde-ikilidir,* Özellikle de, ayrıntılı analizler, Tip IIB'nin eşleşme sabiti 1'den büyükse eğer, değerini tersiyle değiştirecek olursak (dolayısıyla bu değer 1'den küçük olacaktır), sonuçta ortaya çıkan kuramın başlangıçtaki kuramla aynı olacağını ikna edici bir biçimde ileri sürmektedir. Dairesel bir boyutu, Planck-altı ölçekte bir uzunluğa sıkıştırmaya çalıştığımızda bulduğumuz şeye benzer bir biçimde, bu kendinde-ikilik, sonuçta ortaya çıkan kuramın tam da eşleşme sabiti 1'den küçük olan Tip IIB sicim kuramının eşdeğeri olduğunu ortaya koymaktadır.

Buraya Kadar Anlatılanların Bir Özeti

Bakalım nereye geldik. 1980'lerin ortalarına gelindiğinde, fizikçiler beş farklı süpersicim kuramı inşa etmiş bulunuyorlardı. Tedirginlik kuramının yaklaşıklık şemasına göre bu kuramların hepsi de birbirinden farklıymış gibi görünüyordu. Fakat bu yaklaşıklık yöntemi, yalnızca bir sicim kuramında sicim eşleşme sabitinin 1'den küçük olduğu durumlarda geçerliydi. Beklentiler, fizikçilerin herhangi bir sicim kuramında sicim eşleşme sabitinin tam değerini hesaplayabileceği yönündeydi, fakat halihazırda elde bulunan yaklaşık denklemlerin biçimi bunu imkânsız kılmaktadır. Bu yüzden de fizikçiler, beş sicim kuramının her birini, eşleşme sabitlerinin olası değerleri üzerinden, bu değeri hem 1'den küçük, hem 1'den büyük varsayarak, yani hem zayıfhem güçlü eşleşme üzerinden incelemeyi amaçlamaktadır. Fakat geleneksel tedirginlik yaklaşımı yöntemleri sicim kuramlarından herhangi birinin güçlü eşleşme özelliklerine dair bir kavrayış sunmamaktadır.

Kısa süre önce fizikçiler, süpersimetrinin kuvvetinden yararlanarak sicim kuramlarından herhangi birinin güçlü eşleşme özelliklerinden bazılarını nasıl hesaplayabileceklerini öğrendi. Bu alanda çalışan hemen herkesi şaşırtacak şekilde, Heterotik-O sicim kuramının güçlü eşleşme özellikleri ile Tip I sicim kuramının zayıf eşleşme özelliklerinin aynıymış gibi göründüğü, tersi için de aynı durumun söz konusu olduğu anlaşıldı. Dahası Tip IIB sicim kuramının güçlü eşleşme fiziği de zayıfeşleşme fiziğiyle aynı özelliklere sahiptir. Bu beklenmedik bağlantılar, bizi Witten'ın izinden gitmeye ve diğer iki sicim kuramının, Tip IIA ile Heterotik-E'nin genel tabloda nereye oturduğunu görmek için bastırmaya zorlamıştır. Burada insanı şaşırtan daha da acayip durumlarla karşılaşıyoruz. Kendimizi hazırlamak için kısaca konudan ayrılıp tarihe bakalım.

Süperkütleçekimi

1970'lerin sonunda ve 1980'lerin başında, sicim kuramına ilginin yükselmesinden önce, birçok kuramsal fizikçi, kuantum mekaniğini, kütleçekimi ve başka kuvvetleri nokta parçacık çerçevesine dayalı kuantum alan kuramı çerçevesinde birleştirebilecek birleşik bir kuram arayışı içindeydi. Kütle çekimi ve kuantum mekaniğini içeren nokta

parçacık kuramları arasındaki tutarsızlıkların, kuramların büyük oranda simetriyle incelenmesi yoluyla aşılacağı umuluyordu. 1976'da, o sıralarda Stony Brook'ta New York Eyalet Üniversitesi'nde çalışmakta olan Daniel Freedman, Sergio Ferrarave Peter Van Nieuwen-huizen en umut vadeden kuramların süpersimetri içeren kuramlar olduğunu keşfetti, çünkü bozonlar ve fermiyonların birbirini götürdüğü kuantum dalgalanmaları ortaya çıkarma eğilimi, mikroskobik düzeydeki çılgınlığın yatışmasını sağlıyordu. Yazarlar, genel göreliliği kapsamaya çalışan süpersimetrik alan kuramlarını betimlemek için *süperkütleçekimi* terimini geliştirdi. Genel göreliliği kuantum mekaniğiyle birleştirme girişimleri nihayetinde başarısızlığa uğradı. Yine de VIII. Bölüm'de belirttiğimiz üzere, bu araştırmalardan öğrenilecek değerli bir ders vardı, sicim kuramının gelişimini haber veren bir ders.

1978'de hepsi de Ecole Normale Superieure'de çalışmakta olan Eugene Cremmer, Bernard Julia ve Scherk'in çalışmalarıyla belki de daha büyük bir açıklık kazanan bu ders, başarılı olmaya en fazla yaklaşan kuramların 4 boyutlu değil, daha fazla boyutlu olarak formüle edilen süperkütleçekimi kuramları olduğuydu. Özellikle de en ümit verici kuramlar, 10 ya da 11 boyutlu kuramlardı, 11 boyutun maksimum olasılık olduğu anlaşılmıştı." Gözlenen dört boyutla temas, Kaluza ile Klein'ın çizdiği çerçevede de sağlanmıştır: Diğer boyutlar kıvrılmıştır. 10 boyutlu kuramlarda, sicim kuramında olduğu gibi, altı boyut kıvrılmıştır, 11 boyutlu kuramlarda ise yedi boyut.

1984'te fizikçileri sicim kuramı fırtınası sardığında, nokta parçacık anlayışına dayalı süperkütleçekimi kuramlarına bakış açısı da ciddi bir değişime uğradı. Tekrar tekrar vurguladığımız üzere, bir sicimi bugün ve öngörülebilir gelecekte, mevcut kesinlikle inceleyecek olursak, bir nokta parçacık gibi göründüğünü görürüz. Bu gayri resmi söyleyişi biraz daha somut hale getirelim: Sicim kuramında düşük enerjili süreçleri -sicimin ultra-mikroskobik, uzamış niteliğini incelemek için yeterli enerjiye sahip olmayan süreçleri- incelerken, nokta parçacık anlayışına dayalı kuantum alan kuramı çerçevesini kullanarak bir sicimle yapısı olmayan bir nokta parçacık arasında bir yaklaşıklık kurabiliriz. Kısa mesafedeki ya da yüksek enerjili

süreçlerle uğraşırken bu yaklaşıklığı kullanamayız, çünkü sicimin uzama niteliğinin, bir nokta parçacık kuramının yapamadığı şeyi yapma, genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki çatışmaları çözme yetisi açısından kritik önemde olduğunu biliyoruz. Fakatye-terince düşük enerjilerde -yeterince büyük mesafelerde- bu sorunlarla karşı karşıya kalınmaz, bu tür bir yaklaşıklık da genellikle hesapsal bir uygunluk sağlama adına kurulur.

Sicim kuramıyla en yakından yaklaşık olan kuantum alan kuramı, 10 boyutlu süperkütleçekimi kuramından başkası değildir. 10 boyutlu süperkütleçekimi kuramına özgü, 1970'ler ve 1980'lerde keşfedilmiş özelliklerin, sicim kuramının temel kuvvetinin düşük enerjili kalıntıları olduğu anlaşılmıştır artık. Aslına bakarsanız, süpersimetriyi tam anlamıyla nasıl içerdiklerine bağlı olarak birbirinden ayrılan 10 boyutlu, dört farklı süperkütleçekimi kuramı bulunduğu anlaşılmıştır. Bunlardan üçünün, Tip IIA, Tip IIB ve Heterotik-E sicim kuramlarının düşük enerjili nokta parçacık yaklaşıklıkları olduğu görülmüştür. Dördüncüsü, hem Tip I hem de Heterotik-O sicim kuramı için düşük enerjili nokta parçacık yaklaşıklığı vermektedir: Geriye dönüp baktığımızda bunun bu iki sicim kuramı arasındaki yakın bağlantının ilk işareti olduğunu görüyoruz.

11 boyutlu süperkütleçekiminin dışarıda bırakılmış gibi görünmesi dışında bu çok derli toplu bir hikâyedir. 10 boyutta formüle edilen sicim kuramı, 11 boyutlu bir kurama yer bırakmıyormuş gibi görünmektedir. Birkaç yıl boyunca, sicim kuramcılarının hepsinin değil ama çoğunun genel görüşü, 11 boyutlu süperkütleçekiminin sicim kuramı fiziğiyle hiçbir bağlantısı olmayan matematiksel bir tuhaflık olduğu yönündeydi.

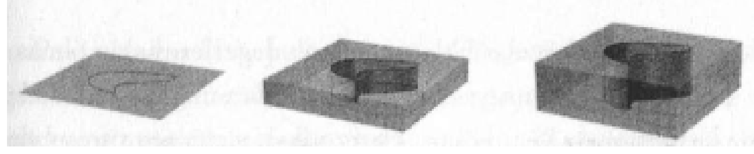
M-Kuramının Pırıltıları

Bugünkü görüş çok farklıdır. Sicim'95 konferansında Witten, Tip IIA sicim kuramıyla yola çıkıp eşleşme sabitini 1'in çok altında olan bir değerden 1'in çok üstünde bir değere çıkaracak olursak, bu durumda halen analiz edebileceğimiz fiziğin (BPS doygunluğundaki

yapılandırmalar) düşük enerjili bir yaklaşıklığı olduğu, bunun da 11 boyutlu süperkütleçekimi *olduğu* savını ortaya atmıştı.

Witten bu keşfi duyurduğunda, dinleyiciler hayrete düşmüştü ve bu keşifle sicim kuramı çevrelerinde büyük bir canlılıkya-kalanmış oldu. Bu alanda çalışan hemen herkese göre, beklenmedik bir gelişmeydi bu. Bu sonuca verdiğiniz ilk tepki, alanda çalışan uzmanların çoğunun verdiği tepkinin aynısı olabilir: *11 boyuta özgü bir kuram nasıl olur da 10 boyutlu farklı bir kuramla ilgili olabilir?*

Bu sorunun cevabı çok önemlidir. Bu cevabı anlayabilmek için Witten'ın vardığı sonucu daha kesin bir biçimde betimlememiz gerekiyor. Aslında önce, Witten ile Princeton Üniversi-tesi'nde doktora sonrası araştırmalar yürüten Petr Hofava'nın daha sonra Heterotik-E sicim kuramı odaklı bir araştırmada vardığı ve bu konuyla yakından ilgili bir sonucu örneklemek daha kolay. Witten ile Elofava, güçlü eşleşmeli Eleterotik-E sicim kuramının 11 boyutlu bir betimlemesi olduğunu bulmuşlardı, Şekil 12.7'de neden böyle olduğu gösteriliyor. Şeklin sol kısmında, Eleterotik-E sicim kuramı eşleşme sabitinin 1'den çok daha küçük olduğunu kabul ediyoruz. Bu alan, önceki bölümlerde betimlediğimiz ve sicim kuramcılarının on yılı aşkın bir süredir üzerinde çalışmakta oldukları alandır. Şekil 12.7'de sağa doğru ilerlerken eşleşme sabitinin büyüklüğünü sırayla artırıyoruz. 1995 öncesinde, sicim kuramcıları bunun ilmek süreçlerini daha önemli kılacağını ve eşleşme sabiti büyüdüğünden, nihayetinde koca bir tedirginlik çerçevesini geçersiz kılacağını öğrenmişlerdi. Fakat hiç kimsenin kuşkulanmadığı bir şey vardı, o da eşleşme sabiti büyüdükçe, yeni bir boyutun görünür hale geleceğiydi! Bu da Şekil 12.7'de gösterilen "dikey" boyuttur. Unutmayın ki, burada başlangıç noktası olarak aldığımız ikiboyutlu ızgara Heterotik-E sicim kuramındaki dokuz boyutun tamamını temsil ediyor. Dolayısıyla yeni dikey boyut, onuncu bir uzamsal boyutu temsil ediyor, zaman boyutuyla birlikte bu da bizi toplam 11 uzay-zaman boyutuna götürüyor.



Şekil 12.7 Heterotik-E sicim eşleşme sabiti artarken, yeni bir uzay boyutu belirir ve sicim genleşip silindirik bir zar şekli alır.

Dahası, Şekil 12.7 bu yeni boyutun çok önemli sonuçlarından birini de resmeder. Bu boyut büyüdükçe, Heterotik-E siciminin *yapısı* değişir. Eşleşme sabitinin büyüklüğü arttıkça, tek boyutlu bir ilmekken genleşip bir kurdeleye, sonra da deforme olmuş bir silindire dönüşür! Başka bir deyişle, Heterotik-E sicimi *aslında* genişliği (Şekil 12.7'deki dikey boyut) eşleşme sabitinin büyüklüğüyle kontrol edilen *ikiboyutlu bir zardır.* On yılı aşkın bir süre boyunca sicim kuramcıları, eşleşme sabitinin çok küçük olduğu varsayımına sıkı sıkıya bağlı tedirginlik yöntemleri kullanmışlardır. Witten'ın savladığı üzere, bu varsayım, temel bileşenlerin aslında gizli bir ikinci boyuta sahip olmalarına karşın tek boyutlu sicimler gibi görünüp davranmasına yol açmıştır. Eşleşme sabitinin çok küçük olduğu yönündeki varsayımı gevşetip Heterotik-E siciminin eşleşme sabitinin büyük olması halindeki fiziğini dikkate alırsak, ikinci boyut açıklık kazanır.

Bu kavrayış, önceki bölümlerde vardığımız sonuçların hiçbirini geçersiz kılmaz, aksine bizi bu sonuçlan yeni bir çerçevede görmeye zorlar. Örneğin bunların hepsi, sicim kuramının gerektirdiği 1 zaman, 9 uzay boyutuyla nasıl uyuşur? VIII. Bölüm den hatırlayacağınız gibi bu sınırlama, bir sicimin titreşebileceği bağımsız yönleri tek tek saymaktan, bu sayının kuantum mekaniği açısından olasılıkların anlamlı değerlere sahip olmasını sağlayacak doğru sayı olması koşulundan doğmaktadır. Henüz keşfettiğimiz yeni boyut, Heterotik-E siciminin titreşebileceği bir boyut değildir, bizatihi "sicimler'myapısında saklanmış bir boyuttur. Başka bir deyişle, fizikçilerin 10 boyutlu uzay-za-man koşulu çıkarımında bulunurken kullandıkları tedirginlik çerçevesi, daha en başta Heterotik-E eşleşme sabitinin küçük olduğu varsayımında bulunur. Epeyce sonra kabul edilmiş olsa da, bu birbiriyle tutarlı iki yaklaşıklığı güçlendirmektedir: Bunlardan biri Şekil 12.7'de zarın genişliğinin az olması, sicim gibi

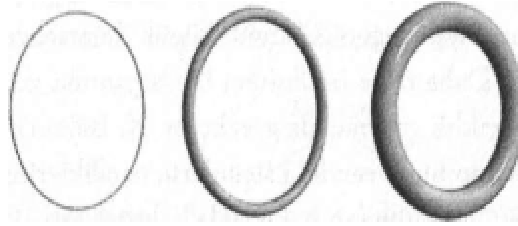
görünmesine yol açmasıdır; diğeriyse 11. boyutun tedirginlik denklemlerinin hassas olamayacağı *kadar* küçük olmasıdır. Bu yaklaşıklık şeması çerçevesinde, tek boyutlu sicimlerle dolu 10 boyutlu bir evren hayal etmeye yöneliriz. Bu noktada, bunun ikiboyutlu zarlar içeren 11 boyutlu bir evrenle bir yaklaşıklıktan ibaret olduğunu görüyoruz.

Teknik sebepler yüzünden Witten, Tip IIA siciminin güçlü eşleşme özelliklerini incelerken önce 11. boyuta rastlamıştı, orada da hayli benzer bir hikâye söz konusuydu. Heterotik-E örneğinde olduğu gibi, büyüklüğü Tip IIA eşleşme sabitiyle kontrol edilen bir 11. boyut vardır. Eşleşme sabitinin değeri arttıkça yeni boyut da büyür. Witten, yeni boyut büyüdükçe, Tip II-A siciminin Heterotik-E örneğinde olduğu gibi genişleyip bir kurdele haline gelmek yerine Şekil 12.8'de gösterildiği gibi genişleyip bir "iç lastiğe" dönüştüğü savını ileri sürmüştü. Witten bir kez daha, kuramcılar Tip IIA sicimlerini sadece uzunlukları olan, kalınlıkları olmayan tek boyutlu nesneler olarak görmüşlerse de, onları böyle görmelerinin sicim eşleşme sabitinin küçük olarak varsayıldığı tedirgin yaklaşıklık şemasının bir yansıması olduğu savını ileri sürmüştü. Yine de Witten'ın ve ikinci süpersicim devrimi sırasında diğer fizikçilerin ileri sürdüğü savlar, Tip IIA ve Heterotik-E "sicimleri"nin esasen 11 boyutlu bir evrende yaşayan ikiboyutlu zarlar olduğu yönünde güçlü kanıtlar ortaya koymaktadır.

Peki ama bu 11 boyutlu kuram *neyin nesidir?* Witten ve diğerleri, düşük enerjilerde (Planck enerjisine kıyasla düşük) bu kuramın uzun zamandır ihmal edilen 11 boyutlu süper-kütleçekimi kuantum alan kuramına yaklaşık olduğu savını ileri sürmüşlerdir. Peki yüksek enerjiler söz konusu olduğunda bu kuramı nasıl betimleyebiliriz? Bu konu, bugün yoğun bir inceleme altındadır. Şekil 12.7 ile 12.8'den 11 boyutlu kuramın i ki -boyutlu uzamış nesneler -ikiboyutlu zarlar-içerdiğini biliyoruz. Birazdan tartışacağımız üzere, başka sayıda boyutlara sahip uzamış nesneler de önemli bir rol oynarlar. Fakat karmakarışık özellikler dışında, *bu 11. boyutun ne olduğunu kimse bilmemektedir.* Zarlar 11. boyutun temel bileşenleri midir? 11. boyutun tanımlayıcı özellikleri nelerdir? 11. boyut nasıl olup da

bildiğimiz fizikle temas kurar? Eşleşme sabitleri küçükse eğer, bu sorulara verebileceğimiz en iyi cevaplar önceki bölümlerde betimlenmiştir, çünkü küçük eşleşme sabitleri söz konusu olduğunda sicim kuramına geri döneriz. Fakat eşleşme sabitleri küçük değilse eğer, bugün hiç kimse bu soruların cevaplarını bilmemektedir.

11 boyutlu kuram her neyse, Witten buna *M-kuramı* demişti. Bu ismin ne anlama geldiği sorusunu, kaç kişiye sorsanız birbirinden o kadar farklı cevap alırsınız. Bazı örnekler verelim: Mystery Theory (gizem kuramı), Mother Theory (ana kuram / "Bütün kuramların anası" gibi), Matrix Theory (Rutgers Üniversitesi nden Tom Banks, Austin'deki Texas Üniversitesi'nden Willy Fischler, Rutgers Üniversitesi'nden Stephen Shenker ve Susskind'in kurama dairyeni bir yorum sunan son çalışmalarına atfen). Fakat ismini ya da özelliklerini sıkı sıkıya kavramak -sızm dahi, M-kurammın beş sicim kuramının hepsini bir araya getiren birleştirici bir alt katman ortaya koyduğu çoktan açıklık kazanmıştır.



Şekil 12.8 Tip IIA sicim eşleşme sabiti artarken, sicimler tek boyutlu ilmeklerken genişleyip bir bisiklet tekerleğinin iç lastiğine benzer ikiboyutlu nesneler haline gelir.

M-Kuramı ve İç Bağlantı Ağları

' Üç kör adam ve bir fille ilgili eski bir atasözü vardır, ilk kör, filin dişini tutar ve hissettiği düz, sert yüzeyi betimler, İkincisi filin bacaklarından birini tutar. Hissettiği sıkı, kaslı girintiyi betimler. Üçüncüsü filin kuyruğunu tutar ve hissettiği ince, kuvvetli uzantıyı betimler. Betimlemeleri birbirinden çok farklı olduğu için ve hiçbiri de

birbirini göremediği için adamların her biri farklı bir hayvanı tuttuğunu düşünür. Uzun yıllar boyunca fizikçiler, bu kör adamlar kadar karanlık içinde olmuşlar, farklı sicim kuramlarının birbirinden çok farklı olduğunu düşünmüşlerdi. Fakat artık ikinci süpersicim devriminin getirdiği kavrayışlar sayesinde fizikçiler, M-kuramının beş sicim kuramının birleştiği o kalın derili hayvan olduğunu anlamışlardır.

Bu bölümde, sicim kuramını kavrayışımızda tedirginlik çerçevesinin -bu bölüm öncesinde örtük olarak bu çerçeveyi kullanmıştık- dışına çıktığımızda doğan değişiklikleri tartıştık. Şekil 12.9'da şimdiye kadar bulduğumuz iç ilişkiler özetlenir, oklar ikili kuramlara işaret eder. Gördüğünüz gibi elimizde bir bağlantılar ağı bulunuyor, fakat bu ağ daha tamamlanmamıştır.

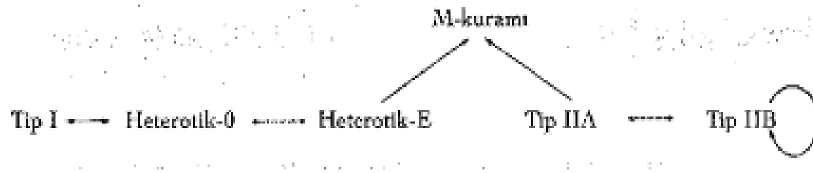
X. Bölüm'deki ikilikleri de dahil ederek bu işi bitirebiliriz.

R yarıçapmdaki bir dairesel boyutla 1/Ryarıçapındaki dairesel bir boyutun yer değiştiği büyük/küçük dairesel çap ikiliğini hatırlayalım. Daha önce bu ikiliğin bir boyutuna göz atmıştık, şimdi buna açıklık getirmemiz gerekiyor. X. Bölüm'de, dairesel bir boyuta sahip bir evrendeki sicimlerin özelliklerini beş sicim kuramı formülasyonundan hangisiyle çalıştığımızı titizlikle belirtmeden tartışmıştık. Bir sicimin sarmal ve titreşim halleri arasındaki yer değişiminin, 1/R yarıçapına sahip dairesel bir boyutun bulunduğu bir evrenin sicim kuramsal tanımını, Ryarıçapı-na sahip dairesel bir boyutun bulunduğu bir evrenle yapabileceğimiz savını ortaya atmıştık. Gözden gizlediğimiz nokta şudur ki, Tip IIA ile Tip IIB sicim kuramları aslında bu ikilik yoluyla birbirlerinin yerini almışlardır, Heterotik-O ve Heterotik-E sicimleri gibi. Büyük/küçük çap ikiliğinin daha kesin bir ifadesi şudur: Tip IIA siciminin Ryarıçapında dairesel bir boyuta sahip bir evrendeki fiziği, Tip IIB siciminin 1/R yarıçapında dairesel bir boyuta sahip bir evrendeki fiziğiyle kesinlikle aynıdır (benzer bir ifade Heterotik-E ve Heterotik-O sicimleri için de geçerlidir). Büyük/küçük yarıçap ikiliğinin bu şekilde rafine edilmesinin X. Bölüm'de vardığımız sonuçlar üzerinde ciddi bir etkisi yoktur, fakat buradaki tartışma açısından önemli bir etkisi vardır.



Şekil 12.9 Oklar, hangi kuramların birbiriyle ikilik oluşturduğunu göstermektedir.

Bunun sebebi de şudur: Büyük/küçük yarıçap ikiliği, Tip IIA ve Tip IIB sicim kuramlarının yanı sıra, Heterotik-O ve Heterotik-E kuramları arasında da bir bağ oluşturarak Şekil 12.10'da noktalı çizgilerle gösterildiği üzere bağlantılar ağını tamamlar. Bu şekil, M-kuramıyla birlikte, sicim kuramlarının beşinin de birbirleriyle ikiz olduğunu gösteriyor. Hepsi de tek bir kuramsal çerçevede birleşmiştir; temeldeki tek ve aynı fiziği tamamlamaya yönelik beş farklı yaklaşım ortaya koyarlar. Şu ya da bu uygulamaya göre, formülasyonlardan biri diğerinden çok daha etkili olabilir. Örneğin zayıf eşleşmeli Heterotik-O kuramıyla çalışmak, güçlü eşleşmeli Tip I sicim kuramıyla çalışmaktan çok daha kolaydır. Yine de her iki kuram da aynı fiziği betimler.



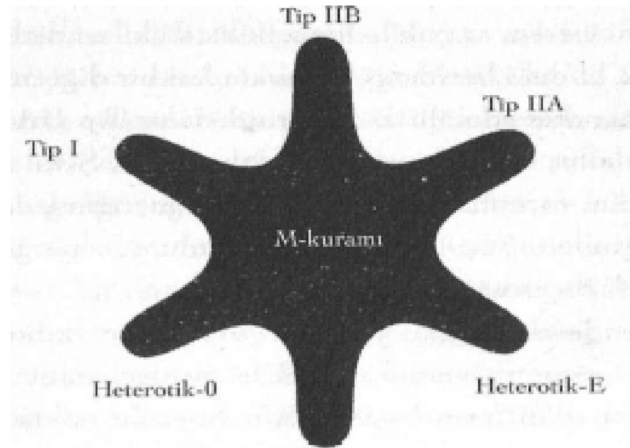
Şekil 12.10 Beş sicim kuramı ve M-kuramı uzay-zamanın geometrik biçimini (X. Bölüm'de olduğu gibi) gerektiren ikilikleri içererek, bir ikilikler ağıyla birleşir.

Büyük Resmi Görmek

Temel noktaları özetlemek üzere bu bölümün başında verdiğimiz iki şekli -Şekil 12.1 ile 12.2 yi- daha eksiksiz olarak anlayabiliriz artık. Şekil 12.1'de, 1995 öncesinde, hiçbir ikiliği dikkate almaksızın elimizde birbirinden belirgin biçimde ayrı beş sicim kuramı olduğunu görüyoruz. Çeşitli fizikçiler, bu kuramların her biri üzerinde

çalışmıştır, fakat ikilikleri anlamaksızın, kuramlar farklı kuramlar gibi görünmektedir. Her bir kuramın eşleşme sabitinin büyüklüğü, kıvrılmış boyutların geometrik biçimi ve büyüklükleri gibi değişen özellikleri vardır. Bu tanımlayıcı özelliklerin, bizatihi kuram tarafından belirleneceği umuluyordu (hâlâ da umulmaktadır), fakat mevcut yaklaşık denklemlerle bu özellikleri belirleme yetisi olmaksızın, fizikçiler doğal olarak, bir dizi olasılıktan kaynaklanan bir fiziği incelemişlerdir. Bu durum da Şekil 12.1'de gölgeli bölgelerle temsil edilmiştir; gölgeli bölgelerdeki her nokta, eşleşme sabiti ve kıvrılma geometrisiyle ilgili belli bir tercihi ifade eder. Herhangi bir ikiliğe başvurmadığımızdan elimizde hâlâ birbirinden ayrı beş kuram (kuramlar koleksiyonu) bulunuyor.

Fakat artık, tartışmış olduğumuz ikiliklerin hepsini uyguladığımızda, eşleşme parametreleriyle geometrik parametreleri değiştirerek merkezde yer alan birleştirici M-kuramını da dahil etmek koşuluyla bir kuramdan diğerine geçebiliriz; bunu Şekil 12.2'de gösteriyoruz. M-kurammı sınırlı bir biçimde kavramış olsak da, bu dolaylı savlar M-kurammın, bizim şu naifbir biçimde birbirinden ayrı gördüğümüz beş sicim kuramını birleştiren bir alt katman oluşturduğu iddiasını kuvvetle desteklemektedir. Üstelik M-kuramının altıncı bir kuramla -11 boyutlu süperkütleçekimiyle- daha yakından ilgili olduğunu öğrenmiş bulunuyoruz, bu da Şekil 12.2'nin daha somut bir versiyonu olan Şekil 12.11'de gösteriliyor.



11 boyutlu süperkütleçekimi

Şekil 12.11 ikiliklerin dahil edilmesiyle birlikte, beş sicim kuramı, 11 boyutlu süperkütleçekimi ve M-kuramı birleşik bir çerçevede bir araya getirildi.

Şekil 12.11, halihazırda kısmen anlaşılmış olsa da M-kuramının temel fikirleri ve denklemlerinin sicim kuramının bütün formülasyonlarını birleştirdiğini gösteriyor. M-kuramı, sicim kuramcılarının gözlerini çok daha büyük bir birleştirici çerçeve konusunda açmış olan kuramsal fildir.

M-Kurammm Şaşırtıcı Bir Yönü: Yayılma Serbestliği

Şekil 12.11'deki kuram haritasında beş yarımada bölgesinden birinde sicim eşleşme sabiti küçük olduğunda, göründüğü kadarıyla kuramın temel bileşeni tek boyutlu bir sicimdir. Fakat bu gözlemle ilgili olarak yeni bir bakış açısı da kazanmış bulunuyoruz. Heterotik-E ya da Tip IIA bölgelerinden başlayıp da sicim eşleşme sabitlerinin değerini artırırsak. Şekil 12.11'deki haritanın merkezine doğru geliriz, tek boyutlu sicim olarak görünen şeyler de ikiboyutlu zarlara dönüşür. Üstelik, hem sicim eşleşme sabitlerini hem de kıvrılmış uzamsal boyutların ayrıntılı biçimlerini içeren, az çok belirsiz ikilik ilişkileri dizisi sayesinde, Şekil 12.11'deki herhangi bir noktadan bir diğerine yavaşça ve sürekli hareket edebiliriz. Heterotik-E ve Tip IIA bakış açılarında rastlamış olduğumuz ikiboyutlu zarlar, Şekil 12.11'deki diğer üç sicim formülasyonundan birine geçtiğimizde de takip edilebileceğinden, beş sicim formülasyonunun her birinin ikiboyutlu zarlar içerdiğini de öğreniriz.

Bu da gündeme iki soru getiriyor. İlki şudur: İkiboyutlu zarlar, sicim kuramının gerçek temel bileşenleri midir? İkincisi, 1970'lerde ve 1980'lerin başında sıfır boyutlu nokta parçacıklardan, tek boyutlu sicimlere ciddi bir sıçramayapıp şimdi de sicim kuramının aslında ikiboyutlu zarlar içerdiğini gördükten sonra, kuramın çok daha fazla boyutlu bileşenlerinin bulunması söz konusu olabilir mi acaba? Bu satırları kaleme aldığımız sırada, bu soruların cevapları tam

anlamıyla bilinmiyordu, fakat durum aşağıda anlatacağımız gibi görünmektedir.

Sicim kuramının formülasyonlarına ilişkin, tedirgin yaklaşıklık yöntemlerinin geçerlilik alanının ötesinde biraz kavrayış kazanabilmek için ağırlıklı olarak süpersimetriye dayandık.

BPS hallerinin özellikleri, kütleleri ve kuvvet yükleri, benzersiz bir biçimde süpersimetriyle belirlenir ve bu da hayal edilemeyecek kadar zor doğrudan hesaplar gerçekleştirmek zorunda kalınmaksızın BPS hallerinin bazı güçlü eşleşme özelliklerini anlamamızı mümkün kılar. Aslına bakarsanız, Horowitz ve Strominger'in bu yönde sarf ettiği ilk çabalar sayesinde, BPS hallerine ilişkin bugün çok daha fazla şey biliyoruz. Özellikle de kütleleri ve taşıdıkları kuvvet yüklerini bilmenin yanı sıra, neye *benzediklerine* dair de açık bir kavrayışımız var artık. Bu tablo da herhalde gelişmeler arasında en şaşırtıcı olanı. BPS hallerinin bazıları tek boyutlu sicimler, diğerleri ise ikiboyutlu zarlar. Şimdiye dek bu şekiller aşina olduğumuz şekillerdir. Fakat şaşırtıcı olan şudur ki, *üçboyutlu,* ikiboyutlu başka şekiller de vardır; aslına bakarsanız olasılıklar dizisi, *dokuz* da dahil bütün uzamsal boyutları içerir. Sicim kuramı ya da M-kuramı ya da nihayetinde nasıl adlandırılıyorsa o kuram, aslında farklı uzamsal boyutlarda bir sürü nesne içerir. Fizikçiler üç uzamsal boyutlu, uzamış nesneleri tanımlamak için üç-zar, dört uzamsal boyutlular için dört-zar gibi terimler geliştirmiştir; bu, dokuz-zara kadar gider (daha da genel olarak, p'nin bir tam sayıyı temsil ettiği, p boyutlu bir nesne için fizikçiler, kulağa pek de hoş gelmeyen bir terminolojiyle p-zar terimini geliştirmişlerdir). Bazen bu terminolojiyle sicimler tek-zar olarak, zarlar da çift-zar olarak tanımlanmıştır. Bütün bu boyutlu nesnelerin aslında kuramın bir parçası olması, Paul Townsend'in 'zarların serbestliği'ni (democracy ofbranes) ilan etmesine yol açmıştır.

Zarların serbestliği bir tarafa, sicimler -tek boyutlu uzamış nesneler- şu sebepten ötürü özeldir. Fizikçiler, Şekil 12.11' de -ki beş sicim bölgesinden hangisinde olursak olalım, tek boyutlu sicimler hariç, farklı sayıda boyuta sahip bütün uzamış nesnelerin kütlesinin, bulunduğumuz bölgeye bağlı sicim eşleşme sabitinin değeriyle *ters*

orantılı olduğunu göstermiştir. Bu da, beş formülasyondan herhangi birinde, zayıf sicim eşleşmesi söz konusu olduğunda, sicimler hariç her şeyin muazzam derecede kütleli -Planck kütlesinden çok daha ağır büyüklük düzenlerinde- olacağı anlamına gelir. Bu kadar ağır olacakları için, dolayısıyla $E=mc^2$*'den* hareketle ortaya çıkmaları hayal dahi edilemeyecek enerjileri gerektireceği için, zarların fiziğin büyük bölümünde küçük bir etkisi vardır (fakat bir sonraki bölümde de göreceğimiz gibi, fiziğin tamamı için geçerli değildir bu). Fakat Şekil 12.11'de yarımada bölgelerinin dışına çıktığımızda, çok boyutlu zarlar hafifler, dolayısıyla da daha fazla önem kazanır.

Bu yüzden de aklınızda tutmanız gereken görüntü şudur: Şekil 12.11'in merkez bölgesinde temel bileşenleri sicimler ya da zarlar değil, farklı boyutlara sahip, hepsi de az çok aynı koşullarda olan "zarlardır." Halihazırda, bu engin kuramın temel birçok özelliğini çok iyi kavramış değiliz. Fakat bildiğimiz bir şey var, o da şu: Merkez bölgeden yarımada bölgelere doğru geçtiğimizde, yalnızca sicimler (ya da Şekil 12.7 ve 12.8'de olduğu üzere kıvrıldıkları için sicim gibi görünen zarlar) bildiğimiz haliyle fizikle -Tablo 1.1'deki parçacıklar ile bu parçacıkların birbirleri arasında etkileşim kurmasını sağlayan dört kuvvet- temas kuracak kadar hafiftir. Sicim kuramcılarının 20 yıla yakın bir süredir kullanmakta olduğu tedirginlik analizleri, başka boyutlardaki süper-kütleli uzamış nesnelerin varlığını keşfetmeye yetecek kadar rafine değildir; analizlere sicimler hâkimdir ve kurama da serbestlikten çok uzak olan sicim kuramı ismi verilmiştir. Şekil 12.11'deki bu bölgelerde, değerlendirmelerin çoğunda sicimler dışında her şeyi görmezden gelmemizin de yine haklı bir sebebi vardır. Esasen şimdiye dek bu kitapta böyle yaptık. Ama artık bu kuramın, daha önce hayal edilenden çok daha zengin olduğunu görüyoruz.

Bunlar Sicim Kuramındaki Cevaplanmamış Sorulara Yanıt Getiriyor mu?

Elem evet hem hayır. Geriye dönüp baktığımızda, gerçek sicim fiziğinden çok tedirgin yaklaşık analizlerin bir sonucu olduğunu gördüğümüz bazı sonuçlardan uzaklaşarak kavrayışımızı

derinleştirmeyi başardık. Fakat, tedirginlik yaklaşımına dayanmayan araçlarımızın bugünkü çapı hayli sınırlı. O dikkat çekici ikilik ilişkileri ağının keşfedilmesi, sicim kuramıyla ilgili olarak bize daha derin bir kavrayış kazandırdı, fakat birçok mesele çözülmemiş bir halde duruyor. Örneğin halihazırda, sicim eşleşme sabitinin değerini bulmak için yaklaşık denklemlerin -daha önce de gördüğümüz gibi, işlenmemiş, bu yüzden de bize yararlı bir bilgi veremeyecek denklemler- ötesine nasıl geçeceğimizi bilmiyoruz. Neden tam olarak üç uzamış uzamsal boyut bulunduğu sorusuyla da, kıvrılmış boyutların ayrıntılı biçimini nasıl seçeceğimiz sorusuyla da ilgili olarak daha geniş çaplı bir kavrayışa erişmiş değiliz. Bu sorular, halihazırda elimizde bulunanlardan daha keskin, tedirginlik yaklaşımına dayanmayan yöntemler gerektiriyor.

Sahip olduğumuz şey, sicim kuramının mantıksal yapısına ve kuramsal erimine dair daha derin bir anlayış. Şekil 12.11 de özetlenen kavrayışlar öncesinde, sicim kuramlarının her birindeki güçlü eşleşme tutumu bir kara kutuydu, tam bir muammaydı. Tıpkı eski haritalarda olduğu gibi, güçlü eşleşme alanı, ejderhalarla ve deniz canavarlarıyla dolu olması muhtemel ayak basılmamış topraklardı. Ama artık, güçlü eşleşmeye doğru yaptığımız yolculuğun, bizi M-kuramının bilinmedik bölgelerine götürdüğünü görmüş olsak da, nihayetinde bizi zayıf eşleşmenin rahat ortamına bırakmıştır; ama bir zamanlar farklı bir sicim kuramı olduğu düşünülen ikili bir dilde.

İkilik ve M-kuramı beş sicim kuramını birleştirir ve önemli bir sonuç ileri sürerler. Biraz evvel tartışmış olduklarımız kadar şaşırtıcı, keşfedilmeyi bekleyen başka sürprizler olmayabilir pekâlâ. Bir haritacı, Dünya'nın küresel temsili üzerinde her yeri doldurabildiğinde, harita tamamlanmış, coğrafi bilgiler tamamlanmış olur. Fakat bu, Antarktika'ya ya da Mikronezya'da yalıtılmış bir adaya yapılan keşif gezilerinin bilimsel ya da kültürel bir değeri olmadığı anlamına gelmez. Yalnızca ve yalnızca, coğrafi keşifler çağının sona erdiği anlamına gelir. Kürenin üzerinde boş bir nokta olmaması bunu sağlar. Şekil 12.11'deki "kuram haritası" da sicim kuramcıları için benzer bir rol oynar. Beş farklı sicim yapısının herhangi birinde

yelken açılarak ulaşılabilecek kuramlar menzilini kapsar. M-kuramının bilinmeyen topraklarını henüz tam olarak anlayamamış olsak da, harita üzerinde boş bölge yoktur. Tıpkı haritacı gibi, sicim kuramcısı da artık savunmalı bir iyimserlikle geçen yüzyılın temel keşiflerini -özel ve genel görelilik; kuantum mekaniği; güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuramlara ilişkin ayar kuramları; süpersimetri; Kaluza ile Klein'ın fazladan boyutları- içeren mantıksal olarak sağlam kuramlar yelpazesinin haritasının Şekil 12.11'de tam olarak çıkarıldığını ileri sürebilir artık.

Sicim kuramcısının -belki de M-kuramcısı dememiz gerek-önündeki zorluk, Şekil 12.11'deki kuram haritasında &ir noktanın gerçekten de evrenimizi betimlediğini göstermektir. Bunu gerçekleştirmek de, çözümleri harita üzerindeki bu ele geçmez noktayı belirleyecek olan eksiksiz ve kesin denklemleri bulmayı, sonra da buna denk düşen fiziği deneylerle kıyaslama yapmayı mümkün kılacak yeterli kesinlikle anlamayı gerektirir. Witten'ın da söylemiş olduğu gibi, "M-kuramının gerçekte ne olduğunu -vücuda getirdiği fiziği- anlamak doğayı kavrama biçimimizi, en azından geçmişteki büyük bilimsel altüst oluşlarda yaşandığı kadar kökten bir biçimde değiştirecektir." İşte bu da, 21. yüzyılın birleştirme programıdır.

XIII. Bölüm

Kara Delikler: Bir Sicim ya da M-Kuramı Bakış Açısı

Sicim kuramı öncesinde genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki çatışma, doğa yasalarının ek yerleri belli olmayan, tutarlı bir bütün olarak birbirine uyması gerektiği yönündeki hissimizi rencide ediyordu. Fakat bu çatışma, giderek şiddetlenen soyut bir ayrılmanın ötesinde bir şeydi. Büyük Patlama anında ortaya çıkan uç koşullarla, kara deliklere hâkim olan koşullar, kütleçekimi kuvvetine ilişkin kuantum mekaniğine özgü bir formulasyon olmaksızın anlaşılamaz. Sicim kuramının keşfiyle birlikte, artık bu derin gizemlerin çözülmesi yönünde bir umudumuz var. Bu ve sonraki bölümde, kara deliklerin ve evrenin kökeninin anlaşılması yönünde sicim kuramcılarının ne kadar yol aldığım anlatacağız.

Kara Delikler ve Temel Parçacıklar

ilk bakışta, kara delikler ile temel parçacıklar kadar birbirinden kökten farklı iki şey hayal etmek güçtür. Genelde kara delikleri gök cisimlerinin en devasası olarak, temel parçacıkları da maddenin en küçük zerreleri olarak resmederiz. Fakat Demet-rios Christodoulou, Werner Israel, Richard Price, Brandon Carter, Roy Kerr, David Robinson, Hawking ve Penrose da dahil birçok fizikçinin 1960'ların sonlarında ve 1970'lerin başında yaptığı araştırmalar, kara deliklerin ve temel parçacıkların birbirinden muhtemelen düşündüğümüz kadar farklı olmadığını göstermiştir. Bu fizikçiler, John Wheeler'ın "Kara deliklerin saçı yoktur," diyerek özetlemeye çalıştığı şeyi doğrulayan giderek çok daha fazla ikna edici kanıt bulmuştur. Wheeler, bu sözleriyle az sayıda ayırıcı özellik dışında, bütün kara deliklerin birbirine benzer göründüğünü anlatmaya çalışıyordu. Ayırıcı özellikler mi? Bunlardan biri tabi ki, kara deliklerin kütlesidir. Peki diğerleri nedir? Araştırmalar, bir kara deliğin taşıyabileceği elektrik ve başka bazı kuvvet yükleri olabileceğini, ayrıca bir de spin hızı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Hepsi budur işte. Aynı kütleye, kuvvet

yüklerine, spin hızına sahip iki kara delik birbirinin tıpatıp aynıdır. Kara deliklerin, birini diğerinden ayıran "saç stilleri" -yani başka içkin özellikleri- yoktur. Alarm sirenini çalan da bu olmuştur. Hatırlayalım, bir temel parçacığı diğerinden ayıran tam da bu tür özelliklerdi; kütle, kuvvet yükleri ve spin. Bu tanımlayıcı özelliklerin benzerlikleri, yıllar içinde bazı fizikçileri tuhaf bir spekülasyonda bulunmaya götürmüştür: Kara deliklerin aslında devasa temel parçacıklar olabileceği spekülasyonuna.

Aslına bakarsanız, Einstein'ın kuramına göre, bir kara delik için minimum bir kütle yoktur. Herhangi bir kütleye sahip bir madde parçasını, yeterince küçük bir büyüklüğe indirecek olursak, genel görelilik kuramının doğrudan bir uygulaması bu maddenin bir kara delik haline geleceğini gösterir. (Kütle ne kadar hafif olursa, o kadar küçültmemiz gerekir.) Böylece düşünsel bir deney gerçekleştirebiliriz: Başta, çok hafif madde parçacıkları alıyoruz, onları daha da küçük kara delikler haline getiriyoruz, sonra da ortaya çıkan kara deliklerin özelliklerini temel parçacıkların özellikleriyle karşılaştırıyoruz. Wheeler'ın "saç yok" ifadesi, bu şekilde oluşturduğumuz kara deliklerin, kütleleri yeterince küçükse eğer, temel parçacıklara çok benzeyeceği yönünde bir sonuca varmamıza yol açıyor. Kara delikler de, temel parçacıklar da, tümüyle kütleleri, kuvvet yükleri ve spinleri tarafından tanımlanan küçük yığınlara benzeyecektir.

Ama burada bir tuzak var. Güneş'in kütlesinden kat kat büyük kütleye sahip astrofiziksel kara delikler, o kadar büyük ve ağırdırlar ki, kuantum mekaniği büyük ölçüde yetersiz kalır ve bunların özelliklerini anlayabilmek için yalnızca genel görelilik denklemlerinin kullanılması gerekir. (Burada kara deliğin genel yapısını tartışıyoruz, bir kara deliğin içinde, merkezde yer alan, boyutları çok çok küçük olduğundan hiç kuşkusuz kuantum mekaniğine özgü bir betimleme gerektiren çöküş noktasını değil.) Biz daha küçük kütleli kara delikler yapmaya çalışırken, öyle bir nokta gelecektir ki kara delikler çok hafil ve çok küçük olduğundan kuantum mekaniği devreye girecektir. Kara deliğin toplam kütlesi Planck kütlesine yakınsa ya da ondan azsa böyle bir şey olur. (Temel parçacık fiziği açısından, Planck kütlesi devasadır; bir protonun kütlesinin 10^{18} katıdır. Fakat kara deliklerle

kıyaslandığında, Planck kütlesi ortalama bir kum tanesinin kütlesine eşittir.) Bu yüzden de küçük kara delikler ile temel parçacıkların yakından ilişkili olabileceğini düşünen fizikçiler, genel görelilik -kara deliklerin kuramsal kalbi- ile kuantum mekaniği arasındaki uyumsuzlukla burun buruna gelmişlerdir. Geçmişte bu uyumsuzluk, bu ilginç yöndeki bütün ilerlemeyi engelliyordu.

Sicim Kuramı İlerlememize İzin Verir mi?

Verir. Kara deliklerin hayli beklenmedik ve incelikli bir biçimde anlaşılması sayesinde, sicim kuramı kara delikler ile temel parçacıklar arasında kuramsal olarak sağlam ilk bağlantıyı sunmuştur. Bu bağlantıya giden yol biraz dolambaçlıdır, fakat bizi sicim kuramındaki en ilginç bazı gelişmelerin içinden geçirir, böylece de yolculuğu pekâlâ çıkmaya değer kılar.

Bahsettiğimiz yol, sicim kuramcılarının karşısına 1980'lerin sonunda çıkan, görünüşte ilgisiz bir soruyla başlamıştır. Matematikçiler ve fizikçiler, altı uzamsal boyutun, bir Calabi-Yau şekli halinde kıvrıldığında, genelde bu şeklin dokusuna gömülmüş iki tür küre bulunduğunu uzun bir süredir biliyordu. Bunlardan biri, bir deniz topunun yüzeyi gibi ikiboyutlu kürelerdi; XI. Bölüm'de anlattığımız, uzayda yırtılmaya yol açan sönme geçişlerinde hayati bir rol oynuyordu bu küreler. Diğerini resmetmek daha zordur, ama o da aynı derecede önemlidir. Bunlar üçboyutlu kürelerdir; uzamış *dört* uzay boyutuna sahip bir evrende okyanus sahillerini süsleyen deniz toplarının yüzeyleri gibi tıpkı. Elbette ki, XI. Bölüm'de tartıştığımız üzere, bizim dünyamızdaki sıradan bir deniz topu üçboyutlu bir nesnedir; ama *yüzeyi,* tıpkı bahçe hortumunun yüzeyi gibi *ikiboyutludur,* yüzeyde herhangi bir konuma işaret etmek için yalnızca iki rakama -uzunluk ve genişlik- ihtiyacınız vardır. Fakat şimdi bir uzay boyutunun daha var olduğunu hayal ediyoruz: Yüzeyi *üçboyutlu,* kendisi *A* boyutlu bir deniz topu düşünelim. Böyle bir deniz topunu gözünüzde canlandırmanız neredeyse imkânsız olduğundan, çoğunlukla daha kolayca gözümüzün önüne getirebildiğimiz daha az boyutlu benzetmelere başvuracağız. Fakat

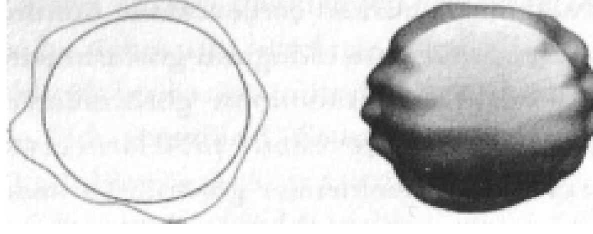
birazdan göreceğimiz gibi, küresel yüzeylerin üçboyutlu niteliğinin bir yönü vardır ki, çok önemlidir.

Fizikçiler, sicim kuramı denklemleri üzerinde çalışarak, zaman geçtikçe, bu üçboyutlu kürelerin küçülüp -çöküp- yok denecek kadar küçük bir hacme inmesinin mümkün, hatta muhtemel olduğunu fark etmişlerdi. Sicim kuramcıları, peki uzayın dokusu da bu şekilde çökecek olursa ne olacak, diye sormuşlardı. Uzamsal dokunun bu şekilde delinmesinin, felakete varan bir etkisi olacak mıydı? Bu soru, XI. Bölüm'de sorduğumuz ve çözdüğümüz soruya çok benzer, ama burada üçboyutlu kürelerin çöküşüyle ilgileniyoruz, oysa XI. Bölüm'de yalnızca ikiboyutlu kürelerin çöküşüyle ilgilenmiştik. (XI. Bölüm'de olduğu gibi, Calabi-Yau şeklinin tamamının değil de, bir parçasının küçüldüğünü hayal ettiğimizden, X. Bölüm'deki küçük yarıçap/büyük yarıçap tanımlaması geçerli değildir.) Burada temel niteliksel farklılık, boyut sayısındaki değişiklikten kaynaklanmaktadır. XI. Bölüm'den hatırladığımız üzere, sicimlerin uzayda hareket ederlerken ikiboyutlu bir küreyi sarabilecekleri kavrayışı, öncü bir kavrayıştı. Yani sicimlerin ikiboyutlu dünya-yaprakları, Şekil 11.6'da olduğu gibi ikiboyutlu bir küreyi tam anlamıyla sarabilir. Bunun da, ikiboyutlu bir kürenin çökmesinin, delinmesinin fiziksel felaketlere yol açmasını engelleyen yeterli bir koruma sağladığı anlaşılmıştır. Fakat şimdi bir Calabi-Yau uzayının içindeki diğer türdeki küreye bakıyoruz; bu kürenin hareket eden bir sicim tarafından sarılamayacak kadar fazla boyutu var. Bunu gözünüzde canlandırmakta sıkıntı çekiyorsanız, boyut sayısını bir eksilterek varacağınız benzetmeyi düşünseniz de olur. Üçboyutlu küreleri, bildiğimiz deniz toplarının ikiboyutlu yüzeyleriymiş gibi düşünebilirsiniz, ama tek boyutlu sicimleri de sıfır boyutlu nokta parçacıklar olarak düşünmek koşuluyla. Bu durumda, sıfır boyutlu bir nokta parçacığın bırakın ikiboyutlu bir küreyi, hiçbir şeyi sarmalayamayacağı olgusuna paralel olarak, tek boyutlu bir sicim de üçboyutlu bir küreyi sar malay amaz.

Böyle bir akıl yürütme sicim kuramcılarını, bir Calabi-Yau şeklinin içindeki üçboyutlu bir küre çökecek olursa eğer -yaklaşık denklemler sicim kuramı çerçevesinde bunun sıradan değilse de son derece mümkün olduğunu göstermiştir- bunun feci bir sonuca yol

açabileceği tahminine götürmüştür. Aslına bakarsanız, sicim kuramı çerçevesinde 1990'ların ortalarından önce geliştirilen yaklaşık denklemler göründüğü kadarıyla, böyle bir çöküş yaşanırsa eğer, evrenin işleyişinin duracağına işaret etmektedir; yaklaşık denklemler, sicim kuramının ehlileştirdiği bazı sonsuzlukların uzamsal dokudaki böyle bir delinmeyle serbest kalacağını göstermektedir. Sicim kuramcıları birkaç yıl boyunca bu rahatsız edici ve bir sonuca varmayan anlayışla yaşamak zorunda kalmıştır. Gelgelelim 1995'te Andrew Strominger, felaket tellallığı yapan bu spekülasyonların yanlış olduğunu göstermiştir.

Strominger, Witten ve Seiberg'un daha önce yapmış oldukları çığır açıcı çalışmaların izinden gitmiş ve sicim kuramının, ikinci süpersicim devriminden kaynaklanan yeni kesinlikle analiz edildiğinde, yalnızca tek boyutlu sicimlerin kuramı olmadığını göstermiştir. Şöyle akıl yürütmüştür: Tek boyutlu bir sicim -alanın yeni diliyle bir tek-zar Şekil 13.1'de gösterdiğimiz üzere tek boyutlu bir uzay parçasını, örneğin bir daireyi tamamen çevreleyebilir. (Unutmayın bu durum Şekil 11,6'da olduğundan farklıdır, 11,6'da tek boyutlu bir sicim zaman içinde hareket ederken ikiboyutlu bir küreyi sarar. Şekil 13.1 zamanda bir anda çekilmiş bir fotoğraf olarak görülmelidir.) Keza, Şekil 13.1'de ikiboyutlu bir zarın -bir iki-zarın- ikiboyutlu bir küreyi sarıp tamamen kaplayabileceğini görüyoruz; tıpkı naylon bir paketleme malzemesinin bir portakalın yüzeyine sıkı sıkı sarılmasında olduğu gibi. Bunu gözümüzde canlandırmak daha zor olsa da, Strominger bu örüntüyü izlemiş ve sicim kuramında yeni keşfedilmiş üçboyutlu bileşenlerin -üç-zarların- üçboyutlu bir küreyi sarıp tamamen kapatabileceğini fark etmiştir. Bu kavrayışı açıkça oturtan Strominger, sonra da basit ve standart bir fiziksel hesaplamayla, sarmalanmış üç-zarın, sicim kuramcılarının üçboyutlu bir kürenin çökmesi halinde ortaya çıkmasından korktukları bütün olası feci etkileri tamamen ortadan kaldıran bir tür hazır kalkan vazifesi gördüğünü göstermiştir.



Şekil 13.1 Bir sicim, tek boyutlu bir kıvrılmış uzay dokusu parçasını çevreleyebilir; ikiboyutlu bir zar ikiboyutlu bir uzay dokusu parçasını sarabilir.

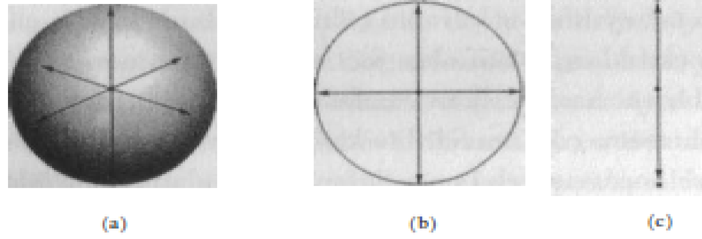
Muhteşem, çok önemli bir kavrayıştır bu. Fakat gücü, kısa bir süre öncesine dek tam anlamıyla aydınlatılmış değildi.

Uzayın Dokusunu İkna Yoluyla Yırtmak

Fizikle ilgili en heyecan verici şeylerden biri, bilginin durumunun kelimenin tam anlamıyla bir gecede nasıl olup da değişebildiğidir. Strominger'in, çalışmasını elektronik internet arşivine gönderdiği gecenin sabahında, ben Cornel1'deki odamda internetten indirdiğim bu makaleyi okuyordum. Strominger bir çırpıda, sicim kuramının heyecan verici yeni kavrayışlarını kullanarak diğer boyutların Calabi-Yau uzayı şeklinde kıvrılmasıyla ilgili dikenli mevzulardan birini çözmüştü. Fakat çalışması üzerine düşünürken, hikâyenin yalnızca yarısını çözmüş olabileceğini düşündüm.

XI. Bölüm'de anlattığımız, uzayda yırtılmaya yol açan sönme geçişleriyle ilgili daha önceki çalışmada, ikiboyutlu bir kürenin önce küçülüp tek bir noktaya indiği, uzay dokusunun yırtılmasına yol açtığı, sonra yeni bir biçimde yeniden büyüdüğü, böylece yırtılmayı onardığı iki kısımlı süreci incelemiştik. Strominger çalışmasında, üçboyutlu bir küre küçülüp bir noktaya indiğinde ne olacağını inceliyordu; sicim kuramında yeni bulunmuş uzamış nesnelerin fiziğin son derece iyi huylu davranmayı sürdürmesini sağladığını göstermişti. Fakat çalışması burada son buluyordu. Hikâyenin, yine uzayın yırtılmasını, ardından kürelerin yeniden şişmesiyle onarılmasını içeren başka bir yarısı daha olabilir miydi?

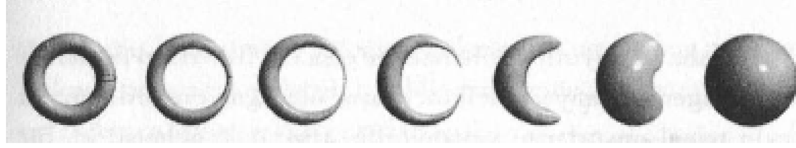
1995'in bahar yarıyılında Dave Morrison, Cornel1'de beni ziyarete gelmişti; o öğleden sonra Strominger'in çalışmasını tartışmak üzere buluştuk. Birkaç saat içinde, "hikâyenin ikinci yarısı'nın neye benzeyebileceğini özetle çıkarmıştık. Utah Üniversitesi'nden Herb Clemens, Columbia Üniversitesi'nden Robert Friedman ve Warwick Üniversitesinden Miles Reid gibi matematikçilerin 1980'lerin sonunda ortaya attığı, Candelas, Green ve o sıralarda Austin'de Texas Üniversitesi'nde çalışan Tristan Hübsch'ün uyguladığı bazı görüşlerden hareketle üçboyutlu bir küre çöktüğünde, Calabi-Yau uzayının yırtılmaya başlamasının, ardından küreyi yeniden şişirerek kendisini onarmasının mümkün olabileceğini görmüştük. Fakat şaşırtıcı olan önemli bir nokta vardı. Çöken kürenin üç boyutu vardı, oysa yeniden şişenin yalnızca iki boyutu. Bunun neye benzediğini resmetmek çok zordur, fakat daha az boyutlu bir benzetmeye odaklanarak bir fikir edinebiliriz. Gözümüzde canlandırması zor olan örnek, yani üçboyutlu bir kürenin çökmesi, yerini ikiboyutlu bir kürenin alması örneği yerine tek boyutlu bir kürenin çöktüğünü, yerini sifirboyutlu bir kürenin aldığını düşünelim.



Şekil 13.2 Farklı boyutlardaki küreleri kolayca gözümüzde canlandırabiliriz; (a) iki, (b) tek ve (c) sıfır boyutlu küreler.

Öncelikle, tek boyutlu küre nedir, sıfır boyutlu küre nedir? Eh, benzetmeyle akıl yürütelim. İkiboyutlu bir küre, üçboyutlu bir uzayda, belli bir merkeze aynı uzaklıkta olan noktalar toplamıdır, Şekil 13.2(a)'da görüldüğü üzere. Aynı fikir üzerinden gidelim: Tek boyutlu bir küre, ikiboyutlu bir uzayda (örneğin bu kâğıdın yüzeyi üzerinde) belli bir merkeze aynı uzaklıktaki noktalar toplamıdır. Şekil 13.2(b)'de görüldüğü üzere bu bir daireden başka bir şey değildir. Son olarak, aynı mantıkla, sıfır boyutlu bir küre de, tek boyutlu bir uzayda (bir çizgi üzerinde) seçilmiş bir merkeze aynı uzaklıktaki noktalar

toplamıdır. Şekil 13.2(c)'de görüldüğü üzere bu da iki noktaya tekabül eder; sıfır boyutlu kürenin "yarıçapı" noktaların her birinin merkeze uzaklığına eşittir. Böylece, daha önceki paragrafta bahsettiğimiz daha az sayıda boyutlu benzetmemiz bir dairenin (tek boyutlu bir küre) küçülmesi, ardından uzayda bir yırtılma meydana gelmesi, sonra da bu kürenin yerini sıfır boyutlu bir kürenin (iki nokta) alması anlamına geliyor. Şekil 13.3'te bu soyut fikri uygulamaya koyduk.



Şekil 13.3 Dairesel bir simit (torus) parçası bir noktada çöküyor. Yüzey yırtılıp açılıyor, iki delik ortaya çıkıyor. Baştaki tek boyutlu kürenin (daire) yerine sıfır boyutlu bir küre (iki nokta) 'yapıştırılıyor", böylece yırtılmış yüzey onarılıyor. Bu da tümüyle farklı bir şekle -bir deniz topuna- dönüşümü mümkün kılıyor.

Şekil 13.3'te gördüğümüz üzere, içine tek boyutlu bir kürenin (bir dairenin) gömülmüş olduğu bir simidin yüzeyiyle yola çıktığımızı düşünelim. Şimdi de zaman içinde gösterdiğimiz dairenin küçüldüğünü, bunun da uzay dokusunun delinmesine yol açtığını düşünelim. Bu delinmeyi, dokunun bir anlığınayır-tılmasma izin verip ardından delinmiş tek boyutlu kürenin -küçülmüş daire- yerine sıfır boyutlu bir küre -iki nokta- geçirerek, yani sıfır boyutlu bu küreyi yırtılma sonucu ortaya çıkan şeklin alt ve üst kısımlarındaki deliklere yerleştirerek onarabiliriz. Şekil 13.3'te görüldüğü üzere, sonuçta ortaya çıkan Şekil kıvrılmış bir muza benzer, hafifçe deforme edilerek (uzayda yırtılmaya yol açmaksızın) yeniden şekillendirilip bir deniz topunun yüzeyine çevrilebilir. Dolayısıyla tek boyutlu bir küre çöküp yerine sıfır boyutlu bir küre geçtiğinde, ilk simidin topolojisinin, yani asıl şeklinin ciddi oranda değiştiğini görüyoruz. Kıvrılmış uzamsal boyutlar bağlamında. Şekil 13.3'te gördüğümüz uzayda yırtılmaya yol açan ilerleme sonuçta Şekil 8.8'de resmedilen evrene, bu da Şekil 8.7'de resmedilmiş evrene dönüşecektir.

Bu daha az boyutlu bir benzetme olsa da, Morrison ile benim Strominger'in hikâyesinin ikinci yarısı olacağını öngördüğümüz şeyin temel unsurlarını yakalıyordu. Bize öyle gelmişti ki, bir Calabi-Yau şeklinin içindeki üçboyutlu bir kürenin küçülmesi sonrasında uzay yırtılabilir, sonra da ikiboyutlu bir kürenin büyümesi yoluyla kendini onarabilirdi; bu da topolojide daha önceki çalışmamızda (XI. Bölüm'de tartışmıştık) Witten'la birlikte bulduğumuz sonuçlardan çok daha ciddi değişikliklere yol açardı. Böylece sicim fiziği tamamen iyi huylu olmayı sürdürürken, bir Calabi-Yau şekli de esasen tamamen farklı bir Calabi-Yau şekline dönüşebilirdi; tıpkı Şekil 13.3'te simidin deniz topuna dönüşmesinde olduğu gibi. Bu noktada bir tablo ortaya çıkmaya başlamış olsa da, hikâyenin ikinci yarısının hiçbir tuhaflık - yani tehlikeli ve fiziksel olarak kabul edilemez sonuçlar- çıkarmadığım ileri sürebilmek için üzerinde çalışmamız gereken önemliyönler vardı. O akşam ikimiz de evlerimize, yepyeni, büyük bir kavrayışı yakalayabilmiş olmanın sevinciyle gittik.

Bir Elektronik Posta Akışı

Ertesi sabah, Strominger'den bir elektronik posta aldım; çalışmasıyla ilgili yorumlarımı ya da tepkilerimi soruyordu. "Bir şekilde Aspinwall ve Morrison'la yürüttüğünüz çalışmayla bağlanması gerekir," diyordu, çünkü anlaşıldığı üzere, o da topoloji değişikliği olgusuyla ilgili olası bir bağlantıyı inceliyordu. Ona derhal, Morrison'la birlikte çıkardığımız ana hatları anlatan bir elektronik posta gönderdim. Cevabında, duyduğu heyecanın, önceki gün Morrison ve benim duyduğumuz heyecandan aşağı kalır yanı olmadığı açıkça görülüyordu.

Sonraki birkaç gün boyunca, üçümüz arasında sürekli bir e-posta akışı yaşandı, uzayda yırtılmaya yol açan ciddi topoloji değişimleriyle ilgili fikrimizi dayandıracağımız niceliksel bir payanda arıyorduk hararetle. Yavaş yavaş, ama kesinlikle, bütün ayrıntılar yerli yerine oturuyordu. Ertesi çarşamba günü, Strominger'in ilk görüşlerini göndermesinden bir hafta sonra, üçboyutlu bir kürenin küçülüp çökmesinin ardından uzamsal dokuda ortaya çıkabilecek o ciddi yeni dönüşümü ortaya koyan ortak bir çalışma taslağı hazırlamıştık.

Strominger'in ertesi gün Harvard'da bir seminer vermesi gerekiyordu, böylece sabah erkenden Santa Barbara'dan ayrıldı. Morrison ve benim çalışma üzerinde ince ayarlar yapmayı sürdürmemizi, sonra da makaleyi o akşam elektronik arşive yüklemeyi kararlaştırmıştık. Gece 23.45'te, hesaplarımızı tekrar tekrar gözden geçirmiş bulunuyorduk, her şey mükemmel biçimde yerli yerine oturuyormuş gibi görünüyordu. Böylece, çalışmamızı elektronik ortama yükledik ve fizik binasından çıktık. Morrison ile birlikte otomobilime doğru yürürken (kendisini o yarı yıl için kiraladığı eve bırakacaktım) tartışmamız şeytanın avukatlığına dönüştü, vardığımız sonuçları kabul etmemeye kararlı birinin getirebileceği en acımasız eleştiriler neler olabilir diye kafayormaya başladık. Park yerinden çıkıp kampustan ayrılmıştık ki, savlarımız güçlü ve inandırıcı olsa da, o kadar da hava geçirmez olmadıklarını fark ettik, ikimiz de çalışmamızın yanlış olabileceği yönünde gerçek bir ihtimal olmadığını biliyorduk, fakat iddialarımızın gücünün ve makalenin bazı yerlerinde seçtiğimiz sözcükler yüzünden fikirlerimizin, vardığımız sonuçların önemini gölgelemesi olası hiddetli bir tartışmayayol açabileceğini fark etmiştik. Makaleyi iddialarımızın derinliğini tazla öne çıkarmayan biraz daha düşük bir tonla yazmış olsaydık, fizik camiasının sunum biçimimize tepki göstermesi olasılığına kapı aralamaktansa, makaleyi iyi yönleriyle değerlendirmesine izin verseydik daha iyi olurdu diye düşündük.

Yolda giderken Morrison, elektronik arşiv kurallarına göre, makalemizi gece 02.00'ye kadar düzeltebileceğimizi hatırlattı; çalışmalar bu saatten sonra kamusal internet erişimine açılıyordu. Arabayı hemen çevirdim, fizik binasına geri döndük, ilk gönderimizi geri çektik, sonra da metnin tonunu düşürmeye çalıştık. Şükürler olsun ki, bunu çabucak hallettik. Kritik paragraflarda birkaç sözcüğü değiştirmek, teknik içeriği tehlikeye at-maksızın, iddialarımızı yumuşatmamızı sağladı. Bir saat içinde makalemizi yeniden gönderdik, sonra da Morrison'ın evine giderken yolda bir daha makale hakkında konuşmamaya karar verdik.

Ertesi gün öğleden sonra, makalemizin heyecanla karşılandığı açıklık kazanmıştı. E-postayla aldığımız birçok cevaptan biri de

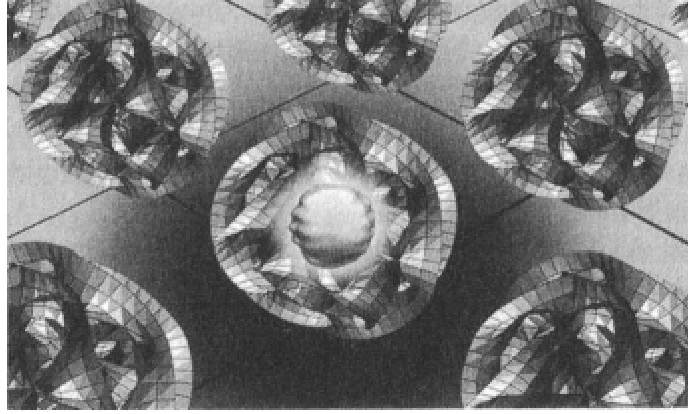
Plesser'dan geliyordu; bir fizikçinin diğerine yapabileceği en güzel iltifatlardan birini kaleme almıştı: "Keşke bunu ben düşünmüş olsaydım dedim!" Önceki gece yaşadığımız korkular bir yana, sicim kuramı camiasını, uzay dokusunda daha önce (1X1. Bölüm'de bahsettiğimiz) keşfedildiği üzere ortalama yırtılmaların yanı sıra, Şekil 13.3'te kabaca gösterilen çok daha ciddi yırtıkların da meydana gelebileceği konusunda ikna etmiştik.

Kara Deliklere ve Temel Parçacıklara Geri Dönelim

Peki bütün bunların kara deliklerle ve temel parçacıklarla ne ilgisi var? Çok ilgisi var. Bunu görebilmek için kendimize, XI. Bölüm'de sorduğumuz soruyu yöneltmemiz gerekiyor. Uzay dokusundaki bu tür yırtılmaların gözlenebilir fiziksel sonuçları nelerdir? Daha önce de gördüğümüz gibi, sönme geçişleri açısından, bu sorunun şaşırtıcı cevabı, pek bir şey olmadığı yönündedir. *Konifold geçişler* -henüz bulmuş olduğumuz, uzayda yırtılmaya yol açan ciddi geçişlere verdiğimiz teknik isim- açısından da, yine fiziksel bir felaket söz konusu değildir (genel görelilikte böyle bir felaket söz konusudur), ama elbette daha aşikâr gözlenebilir sonuçlar söz konusudur.

Bu gözlenebilir sonuçların gerisinde birbiriyle ilişkili iki kavram yatmaktadır; ikisini de sırayla açıklayacağız. Öncelikle, biraz önce tartışmış olduğumuz üzere, Strominger'in ilk atılımı, bir Calabi-Yau şeklinin içindeki üçboyutlu bir kürenin bir felak ete yol açmaksızın küçülüp çökebileceğini, çünkü etrafına sarılmış bir üç-zarın mükemmel bir koruyucu kalkan oluşturduğunu fark etmesiydi. Peki ama böyle bir sarmalanmış-zar konfigürasyonu neye benzer? Cevap Horowitz ile Stromin-ger'in daha önce yaptıkları bir çalışmada yatmaktadır; ikili bu çalışmada, üçboyutlu kürenin etrafına "sarmalanmış" üç-zarın, bizler gibi, doğrudan yalnızca uzamış üç uzamsal boyutu tanıyan kişilere, bir kara deliğin kütleçekimi alanı gibi görünecek bir kütleçekimi alanı oluşturacağını göstermişti. Bu belirgin *değildir ve* ancak, zarlara hâkim olan denklemlerin ayrıntılı bir biçimde incelenmesiyle açıklık kazanır. Yine, böyle çok boyutlu yapıları doğru bir biçimde kâğıda geçirmek zordur, fakat Şekil 13.4, ikiboyutlu küreler içeren daha az sayıda boyutlu bir benzetmeye dair

kabaca bir fikir vermektedir, ikiboyutlu bir zarın ikiboyutlu bir kürenin (bu küre de uzamış boyutlarda bir yerde konumlanmış bir Calabi-Yau şeklinin içinde bulunmaktadır) etrafına sarılabileceğini görüyoruz. Uzamış boyutlardan buraya doğru bakan biri, sarılmış zarı, kütlesiyle ve taşıdığı kuvvet yükleriyle hissedecektir; Horowitz ve Strominger bu özelliklerin bir kara deliğin özellikleri gibi görüneceğini göstermiştir. Dahası, Strominger 1995 tarihli çığır açıcı makalesinde, üç-zarın kütlesinin -yani kara deliğin kütlesi- sardığı üçboyutlu kürenin hacmiyle doğru orantılı olacağını göstermiştir: Kürenin hacmi ne kadar büyük olursa, üç-zar da onu sarmak için o kadar büyük olmalıdır, bu yüzden de daha kütleli olur. Aynı şekilde, kürenin hacmi ne kadar küçük olursa, onu saran üç-zar da o kadar küçük olur. O halde bu küre çökerken, küreyi saran, bir kara delik gibi algılanan bir üç-zar da öyle görünüyor ki daha hafifleyecektir. Üçboyutlu küre sıkışmış bir nokta haline geldiğinde ona tekabül eden kara delik -şimdi sıkı du-run- kütlesiz olur. Kulağa tümüyle muamma gibi gelse de -küt-lesiz kara delik de neyin nesi oluyor?- bu muammayı birazdan sicim fiziğinin daha aşina olduğumuz kısımlarıyla bağlantılan-dıracağız.



Şekil 13.4 Bir zar kıvrılmış boyutlar içindeki bir küreyi sardığında, bildik boyutlar içinde bir kara delik gibi görünür.

Hatırlamamız gereken ikinci şey, IX. Bölüm'de tartıştığımız üzere bir Calabi-Yau şeklindeki delik sayısı, düşük enerjili, dolayısıyla düşük kütleli sicim titreşim örüntülerini, yani Tablo 1.1'de yer alan parçacıkların yanı sıra, kuvvet taşıyıcılarını da açıklaması mümkün

örüntüleri belirler. Uzayda yırtılmaya yol açan konifold geçişler delik sayısını değiştirdiğinden (örneğin Şekil 13.3'teki deliğin yırtılma/onarılma süreciyle ortadan kalkmasında olduğu gibi), düşük kütleli titreşim örüntülerinin sayısında da bir değişim olmasını bekleriz.

Gerçekten de Morrison, Strominger ve ben bunu ayrıntılı olarak incelediğimizde, kıvrılmış Calabi-Yau boyutlarındaki sıkışıp noktacık haline gelmiş üçboyutlu kürenin yerini ikiboyutlu yeni bir küre aldığında kütlesiz sicim titreşim örüntülerinin sayısının tamı tamına bir arttığını görmüştük. (Şekil 13.3'te simidin deniz topuna dönüşmesi örneği, delik sayısının -dolayısıyla örüntü sayısının- azaldığını düşünmenize yol açacaktır, fakat anlaşıldığı üzere bu az sayıda boyutlu olan benzetmenin yanıltıcı bir özelliğidir.)

Önceki iki paragrafta geçen gözlemleri birleştirelim ve bir Calabi-Yau şeklinin içindeki üçboyutlu bir kürenin büyüklüğü giderek küçülürken çekilmiş fotoğraflarını düşünelim. İlk gözlemimiz, bu üçboyutlu küreyi saran üç-zarın -bize bir kara delik gibi görünmektedir- kütlesinin giderek küçüleceği, nihayetinde kürenin küçülmesinin, çöküşünün son aşamasında kütlesiz hale geleceğini söylemektedir. Peki ama, yukarıda da sorduğumuz gibi bu ne anlama gelmektedir? İkinci gözleme başvurduğumuzda bu sorunun cevabı açıklık kazanacaktır. Çalışmamız, uzayda yırtılmaya yol açan konifold geçişten doğan, yeni, kütlesiz sicim titreşim örüntüsünün, *kara deliğin dönüştüğü kütlesiz bir parçacığın mikroskobik bir tanımı olduğunu göstermiştir.* Bir Calabi-Yau şekli uzayda yırtılmaya yol açan konifold bir geçiş yaşarken, başta kütleli olan bir kara deliğin giderek daha hafifleyeceği, sonunda kütlesiz hale geleceği, sonra da kütlesiz bir parçacığa -örneğin kütlesiz bir fotona- dönüşeceği sonucuna vardık; sicim kuramına göre bu kütlesiz parçacık belli bir titreşim örüntüsü gösteren tek bir sicimden başka bir şey değildir. Böylece sicim kuramı, kara delikler ile temel parçacıklar arasında doğrudan, somut ve niceliksel olarak çürütülemez bir bağlantıyı ilk kez açıkça ortaya koymuştur.

Kara Delikleri "Eritmek"

Kara delikler ile temel parçacıklar arasında bulduğumuz bağlantı, hepimizin gündelik hayattan aşina olduğu, teknik olarak faz geçişi diye bilinen bir şeye çok benzer. Son bölümde, bir faz geçişinin basit bir örneğinden bahsetmiştik: Su; katı (buz), sıvı (sıvı su) ve gaz (buhar) olarak var olabilir. Bunlar suyun fazları olarak bilinir, suyun bir halden diğerine geçmesine ise *faz geçişi* denir. Morrison, Strominger ve ben, bu tür faz geçişleriyle bir Calabi-Yau şeklinden diğerine geçişi sağlayan, uzayda yırtılmaya yol açan konifold geçişler arasında sıkı bir matematiksel ve fiziksel benzerlik olduğunu göstermiştik. Tıpkı, hayatında hiç (sıvı) su ya da (katı) buz görmemiş birinin ikisinin temelde aynı maddenin iki fazı olduğunu hemen fark edememesinde olduğu gibi, fizikçiler de incelediğimiz kara delik türleriyle temel parçacıkların aslında temelde aynı sicimsi maddenin iki fazı olduğunu önceden fark edememişlerdi. Suyun hangi fazda olacağını çevredeki sıcaklık belirlerken, sicim kuramı çerçevesinde bazı fiziksel konfigürasyonların kara delikler mi yoksa temel parçacıklar olarak mı görüneceğini diğer Calabi-Yau boyutlarının topolojik biçimi -şekli- belirler. Yani ilk fazda, ilk Calabi-Ya-u şeklinde (diyelim ki buz fazının benzerinde) bazı kara delikler bulunduğunu görüyoruz. İkinci aşamada, ikinci Calabi-Yau şeklinde (sıvı su fazının benzeri) bu kara delikler bir faz geçişi yaşamış -tabiri caizse "erimiş"- temel sicim titreşim örüntüleri haline gelmişlerdir. Uzayın konifold geçişlerle yırtılması, bizi bir Calabi-Yau fazından diğerine götürür. Bunu yaparken de, kara delikler ile temel parçacıkların, tıpkı su ve buz gibi bir madalyonun iki yüzü olduğunu görüyoruz. Kara deliklerin sicim kuramı çerçevesine sıkı sıkıya oturduğunu görüyoruz.

Aynı su benzetmesini, uzayda yırtılmaya yol açan bu ciddi dönüşümler ile sicim kuramının beş ayrı formülasyonundan birinin diğerine dönüşmesi için de kullanmıştık (XII. Bölüm'de), çünkü aralarında derin bir bağlantı vardır. Şekil 12.11 yoluyla beş sicim kuramının birbirleriyle ikili olduğunu, böylece her şeyi birleştiren tek bir çatı altında birleştiğini ifade etmiştik hatırlarsanız. Peki ama, bir betimlemeden diğerine sürekli geçebilme becerisi -Şekil 12.11'de verdiğimiz harita üzerinde herhangi bir noktadan yola çıkıp bir başka noktaya varmak- diğer boyutların bir Calabi-Yau şekli ya da diğeri biçiminde kıvrılmasına izin vermemiz halinde de mümkün müdür?

Topolojinin değiştiği ciddi sonuçların keşfi öncesinde, bu sorunun cevabının hayır olduğu tahmin ediliyordu, çünkü bir Calabi-Yau şeklini sürekli değiştirip bir başka Calabi-Yau şekli haline getirmenin bilinen bir yolu yoktu. Ama artık cevabın evet olduğunu görüyoruz: Uzayda yırtılmaya yol açan, fiziksel olarak anlamlı bu konifold geçişler sayesinde, bir Calabi-Yau uzayını sürekli bir başka Calabi-Yau uzayına dönüştürebiliriz. Eşleşme sabitlerini ve kıvrılmış Calabi-Yau geometrisini değiştirdiğimizde, bütün sicim yapılarının tek bir kuramın farklı fazları olduğunu görüyoruz bir kez daha. Bütün diğer boyutların kıvrılması sonrasında bile, Şekil 12.11'deki birlik varlığını sürdürür.

Kara Delik Entropisi

En başarılı kuramsal fizikçilerin bazıları, uzayda yırtılmaya yol açan süreçlerin mümkün olup olmadığı, kara deliklerle temel parçacıklar arasında bir bağlantı olasılığı bulunup bulunmadığı konusunda yıllardır spekülasyonlarda bulunmaktadır. Bu tür spekülasyonlar başta kulağa bilim kurgu gibi gelse de, sicim kuramının keşfi ve kuramın genel görelilikle kuantum mekaniğini birleştirme becerisi bu olasılıkları son dönemlerin biliminin ön cephesine sıkı sıkıya yerleştirmemizi mümkün kılmıştır. Bu başarı da bize, evrenimizin yıllardır çözülmeye direnç göstermiş başka gizemli özelliklerinin de sicim kuramının gücüne mağlup olup olmayacağı sorusunu sorma cesareti vermiştir. Bu özelliklerin önde gelenlerinden biri de *kara delik entropisi* kavramıdır. Sicim kuramının, çeyrek asırlık çok çok önemli bir problemi başarıyla çözerek gücünü son derece etkileyici bir biçimde gösterdiği bir alandır bu.

Entropi, bir düzensizlik ya da rasgelelik ölçüsüdür. Örneğin masanız, açık duran üst üste konmuş kitaplarla, yarısı okunmuş makaleler, eski gazeteler, işe yaramaz postalarla doluysa, son derece düzensiz bir halde, yani yüksek entropi durumunda demektir. Öte yandan makaleleriniz alfabetik sıraya göre kutulara konmuş, gazeteleriniz kronolojik sıraya göre yerleştirilmiş, kitaplarınız yazarların isimlerine göre alfabetik sıraya dizilmiş, kalemleriniz kalemliğe konmuş haldeyse masanız son derece düzenli bir halde,

yani düşük entropi durumunda demektir. Bu örnek temel fikri resmediyor, fakat fizikçiler entropiye, bir şeyin entropisini kesin bir sayısal değer kullanarak tanımlamayı mümkün kılan tamamen niceliksel bir tanım getirmişlerdir: Büyük sayılar, entropinin yüksek olması, küçük sayılar düşük olması anlamına gelir. Ayrıntılar biraz karmaşık olsa da, bu sayı, kabaca söyleyecek olursak belli bir fiziksel sistemdeki bileşenlerin, sistemin genel görünümünü olduğu gibi bırakarak yeniden düzenlenme olasılıklarını ifade eder. Masanız düzgün ve temizse, herhangi bir yeniden düzenleme -gazetelerin, kitapların ya da makalelerin sırasını değiştirmek, kalemleri kalemlikten çı-karmak- onun o son derece düzenli olan örgütlenme biçimini bozacaktır. Bu durum masanın düşük entropiye sahip olmasını açıklar. Oysa, masanız karmakarışıksa, gazetelerin, makalelerin ve işe yaramaz postaların çok farklı biçimlerde yeniden düzenlenmesi, onu yine karmakarışık bir halde bırakacak, genel görünümünü etkilemeyecektir. Bu da masanın yüksek entropiye sahip olmasını açıklar.

Elbette ki, bir masanın üstündeki kitaplar, makaleler ve gazetelerin yeniden düzenlenmesinin tanımı -ve hangi yeniden düzenlemelerin "genel görünümü bozulmadan bırakacağı"na karar vermek- bilimsel kesinlikten yoksundur. Entropinin eksiksiz tanımı aslında, bir fiziksel sistem içindeki temel bileşenlerin, sistemin büyük makroskobik özelliklerini (örneğin enerjisi ve basıncını) etkilemeyen mikroskobik kuantum mekaniğine özgü özelliklerinin olası yeniden düzenlemelerinin sayısını bulmayı gerektirir. Entropinin, bir fiziksel sistemdeki genel düzensizliği tam olarak ölçen tamamen niceliksel kuantum mekaniğine özgü bir kavram olduğunu anladığınız sürece, ayrıntılar önemli değildir.

197O'te, o sıralarda Princeton'da John Wheeler'ın yüksek lisans öğrencisi olan Jacob Bekenstein cüretkâr bir iddiada bulunmuştu. Bekenstein, kara deliklerin entropiye -hem de çok yüksek miktarda- sahip olabileceğini ileri sürmüştü. Bekenste-in'ı harekete geçiren şey, *termodinamiğin ikinci yasasıydı;* neredeyse kutsal sayılan bu çok sınanmış yasa, bir sistemin entropisinin her zaman arttığını söylüyordu: Eler şey daha fazla düzensizliğe eğilimlidir. Dağınık

masanızı toplayıp entropisini azaltsanız bile, vücudunuzun ve odadaki havanın entropisi dahil toplam entropi aslında yükselir. Gördüğünüz gibi, masanızı temizlemek için enerji harcamanız gerekir; kaslarınıza bu enerjiyi vermeniz için vücudunuzdaki düzenli yağ moleküllerinin bazılarını bozmanız gerekir; temizlik yaparken vücudunuz ısı verir, bu da etraftaki hava moleküllerini daha hareketli ve düzensiz bir hale sokar. Bütün bu etkiler toplandığında, masanızın entro-pisindeki azalmayı telafi etmenin ötesine geçerler, böylece toplam entropi artmış olur.

Bekenstein'ın sorusu şuydu: Peki masanızı bir kara deliğin olay ufkunun yakınında temizlerseniz ve yenice hareketlenmiş hava moleküllerini bir elektrik süpürgesiyle odanın içinden, kara deliğin gizli derinliklerine doğru çekerseniz ne olur? Daha da ileri gidebiliriz: Elektrik süpürgesi bütün havayı, masanın üstündeki her şeyi, hatta masanın kendisini kara deliğin içine çekip sizi soğuk, havasız, son derece düzenli odada tek başınıza bırakırsa ne olur? Bekenstein'ın mantığına göre, odanızdaki entropi kesinlikle azalmış olacağından, termodinamiğin ikinci yasasını gerçekleştirmenin tek yolu, kara deliğin entropiye sahip olması ve bu entropinin kara deliğin içine madde çekilirken yeterince yükselmesi, kara deliğin dış kısmının dışında gözlenen entropik azalmayı bozması olacaktı.

Aslına bakarsanız, Bekenstein savını güçlendirmek için, Stephen Hawking'in vardığı meşhur bir sonuçtan yararlanmıştı. Hawking, bir kara deliğin olay ufkunun alanının -buranın bütün kara delikleri çevreleyen geri dönüşü olmayan yüzey olduğunu hatırlayalım-herhangi bir fiziksel etkileşimde hep arttığını göstermişti. Bir kara deliğin içine bir asteroitin düşmesi ya da yakınlardaki bir yıldızın yüzeyindeki gazın kara delikle birleşmesi ya da iki kara deliğin çarpışıp birleşmesi halinde, bu ve başka bütün süreçlerin herhangi birinde bir kara deliğin olay ufkunun toplam alanı her zaman büyür. Bekenstein a göre, toplam alanın daha büyümesi yönündeki kaçınılmaz gelişme, termodinamiğin ikinci yasasında ifadesini bulan toplam entropinin daha büyümesi yönündeki kaçınılmaz gelişmeyle arada bir bağ olduğunu akla getiriyordu.

Fakat daha yakından incelendiğinde, fizikçilerin çoğu iki sebepten ötürü Bekenstein'ın fikrinin doğru olamayacağını düşünüyordu. İlki, kara deliklerin koca evrendeki en düzenli ve organize nesneler arasında görünmesidir. Kara deliğin kütlesi, taşıdığı kuvvet yükleri, spini ölçüldüğünde, kimliği tamamen ortaya çıkarılmış olur. Bu az sayıda tanımlayıcı özellikle, bir kara delik düzensizliği mümkün kılacak yeterli yapıdan yoksunmuş gibi görünmektedir. Nasıl ki üzerinde yalnızca bir kitap ve bir kalem duran bir masada pek kargaşa yaratamazsanız, kara delikler de düzensizliği destekleyemeyecek kadar basit görünmektedir. Bekenstein'ın iddiasını hazmetmenin zor olmasının ikinci sebebiyse, entropinin, burada da tartışmış olduğumuz üzere, kuantum mekaniğine özgü bir kavram olması, kara deliklerin ise yakın zaman öncesine dek karşı cepheye, klasik genel görelilik cephesine sıkı sıkıya bağlı görülmesidir. 1970'lerin başında, genel görelilik ile kuantum mekaniğini birleştirmenin bir yolu yokken, bir kara deliğin olası entropisini tartışmak en iyi ihtimalle tuhaf görünüyordu.

Kara Ama Ne Kadar Kara?

Anlaşıldığı üzere, Hawking de kara deliklerin alan artışı yasasıyla kaçınılmaz entropi artışı yasası arasındaki benzerlik üzerine düşünmüştü, fakat bunun bir tesadüften başka bir şey olmadığına karar vererek bir kenara bırakmıştı. Nihayetinde Hawking, kendisinin alan artışı yasası ile James Bardeen ve Brandon Carter'la birlikte buldukları başka sonuçlara dayanarak kara deliklerle ilgili yasalar ve termodinamik yasaları ciddiye alınacak olursa bir kara deliğin olay ufku alanını entropiyle tanımlamak zorunda kalacağımızı bulmakla kalmamış, kara deliğe bir *sıcaklık* atfetmemiz gerekeceğini de anlamıştı (tam olarak, kara deliğin kütleçekimi alanının olay ufkundaki gücüyle belirlenen değerde bir sıcaklık). Fakat eğer bir kara delik sıfır olmayan bir sıcaklığa sahipse (ne kadar düşük olursa olsun), en temel, en yerleşik fizik ilkeleri kara deliğin tıpkı parlayan bir lamba gibi radyasyon vermesini *gerektirir.* Fakat herkesin bildiği üzere, kara delikler karadır; dışarıya hiçbir şey vermedikleri varsayılır. Hawking ve hemen herkes, bunun Bekenstein'ın iddiasını devre dışı bıraktığı konusunda hemfikirdi. Hawking bunun yerine,

entropiye sahip madde bir kara deliğe atılırsa, bu entropinin kaybolduğunu kabul etmeye hazırdı, bu kadar basit ve açıktı işte. Termodinamiğin ikinci yasası için bu kadaryeter.

Hawking, 1974'te gerçekten hayret verici bir şeyi keşfedinceye dek durum böyleydi. Hawking, kara deliklerin tamamen kara *olmadığım* söylüyordu. Kuantum mekaniği bir kenara bırakılıp dayalnızca klasik genel görelilik yasalarına başvuracak olursak, ilk olarak altmış yıl önce bulunduğu üzere, kara deliklerin, kütle çekimlerinin elinden hiçbir şeyin -ışığın bile- kurtulmasına izin vermeyeceğini kesinlikle söyleyebilirdik. Fakat kuantum mekaniğinin işin içine dahil edilmesi bu sonucu ciddi biçimde değiştiriyordu. Genel göreliliğin kuantum mekaniğine özgü bir versiyonu bulunmasa da, Hawking sınırlı, fakat güvenilir sonuçlar veren bu iki kuramsal aracın kısmi bir birliğine ustalıkla hâkim olabilmişti. Bulduğu en önemli sonuç da, kara deliklerin kuantum mekaniğine özgü radyasyon *yaydığı* yönündeydi.

Hesaplamalar uzun ve karmaşıktır, fakat Hawking'in temel fikri basitti. Belirsizlik ilkesi sayesinde, uzay boşluğunun dahi sanal parçacıkların bir anlığına varlık bulduğu, ardından birbirlerini ortadan kaldırdığı hareketli, bulanık bir karmaşa içinde olduğunu görmüştük. Bu çılgın kuantum davranışı, bir kara deliğin olay ufkunun hemen dışında kalan uzay bölgesinde de meydana gelir. Fakat Hawking, kara deliğin kütleçekimi kuvvetinin bir sanal foton çiftine de diyelim ki onları birinin deliğin içine çekilmesini mümkün kılacak kadar ayırmaya yetecek ölçüde enerji verebileceğini görmüştü. Eşi kara deliğin girdabında kaybolup gittiğinden, diğer fotonun artık ortadan kaldıracak bir eşi olmayacaktı. Hawking, geride kalan fotonun kara deliğin kütleçekimi alanından enerji takviyesi aldığını, eşi içeri düşerken onun dışa, kara delikten uzağa fırlatıldığını göstermişti. Hawking, bu sanal foton çiftinin birbirinden ayrılmasının, bunun kara deliğin ufkunda heryerde tekrar tekrar gerçekleşmesinin kara deliğe uzaktan, enıniyet içinde bakan birine dışarıya doğru düzenli bir radyasyon akışı gibi görüneceğini fark etmişti. Kara delikler *parlar.*

Dahası Hawking, uzaktaki bir gözlemcinin yayılan radyasyonla ilişkilendireceği sıcaklığı da hesaplayabilmiş ve bu sıcaklığın kara

deliğin olay ufkundaki kütleçekimi alanının kuvvetiyle belirlendiğini bulmuştu; tam da kara delik fiziği yasalarıyla termodinamik yasalarının ileri sürdüğü üzere. Bekenstein haklıydı: Hawking'in vardığı sonuçlar bu benzerliğin ciddiye alınması gerektiğini gösteriyordu. Aslına bakarsanız sonuçlar bunun, benzerliğin ötesine geçen bir şey olduğunu, bir *aynılık* olduğunu gösteriyordu. Bir kara deliğin entropisi vardır. Bir kara deliğin sıcaklığı vardır. Kara delik fiziğinin kütleçekimi yasaları ve termodinamik yasalarının son derece tuhaf bir kütleçekimi bağlamındaki bir yeniden yazımından başka bir şey değildir. Hawking'in 1974'te patlattığı bomba buydu işte.

Bahsettiğimiz ölçeklere dair bir fikir verelim: Anlaşıldığı kadarıyla bütün detaylar hesaba katıldığında, kütlesi Güneş'in kütlesinin yaklaşık üç katı olan bir kara deliğin sıcaklığı, mutlak sıfırdan bir derecenin yüz milyonda biri kadar fazladır. Sıfır değildir ama neredeyse sıfırdır. Kara delikler kara değildir, ama güç bela. Maalesef bu da bir kara deliğin yaydığı radyasyonun az ve deneylerle tespit edilemeyecek olmasına yol açar. Fakat bir istisna vardır. Hawking'in hesapları, bir kara deliğin kütlesi ne kadar azsa, sıcaklığının o kadaryüksek, saldığı radyasyonun o kadar fazla olacağını da göstermiştir. Örneğin küçük bir asteroit kadar hafifbir kara delik, bir milyon megatonluk bir hidrojen bombası kadar radyasyon salacaktır; ve bu radyasyon da elektromanyetik tayfın gamma ışını kısmında yoğunlaşmış olacaktır. Astronomlar geceleyin gökyüzünde bu türdeki radyasyonu aramış, fakat birkaç uzak olasılık dışında elleri boş kalmıştır; böyle küçük kütleli kara deliklerin varlar - sa bile pek ender olduklarına dair muhtemel bir işarettir bu da. Hawking'in sık sık şakayla karışık dikkat çektiği üzere bu çok kötü, zira çalışmalarının öngördüğü kara delik radyasyonu tespit edilebilecek olsaydı, hiç kuşku yok ki bir Nobel Ödülü kazanırdı.

Sıcaklığı azıcık, bir derecenin milyonda biri kadar olsa da, diyelim ki, kütlesi Güneş'in üç katma eşit bir kara deliğin entropisini hesaplayacak olsak bulacağımız sonuç kesinlikle muazzam bir rakam olur: Bir tane 1 ve arkasından 78 tane de 0! Deliğin kütlesi ne kadar büyük olursa, entropisi de o kadar fazla olur. Hawking'in hesaplarının başarısı, bunun, bir kara deliğin taşıdığı muazzam

miktardaki düzensizliği yansıttığını aksi ileri sürülemeyecek şekilde ortaya koymaktadır.

Peki ama neyin düzensizliği? Daha önce de görmüş olduğumuz gibi, kara delikler son derece basit nesneler gibi görünmektedir, peki o halde bu muazzam düzensizliğin kaynağı nedir? Hawking'in hesapları bu konuda hiçbir şey söylemez. Genel görelilik ve kuantum mekaniği arasında sağladığı kısmi birlik bir kara deliğin entropisinin sayısal değerini bulmak için kullanılabilir, fakat bunun mikroskobik olarak ne anlama geldiğine dair hiçbir fikir vermez. Yaklaşık çeyrek asır boyunca, en büyük fizikçilerin bazıları kara deliklerin entropilerini, hangi olası özelliklerinin açıklayabileceğini anlamaya çalışmışlardır. Fakat kuantum mekaniği ile genel görelilik arasında sağlam bir kaynaşma sağlanmaksızın, cevabın ne olabileceğine dair ipuçları ortaya çıksa da, muamma çözülmeden kalıyordu.

Ve Sicim Kuramı Sahneye Çıkar

Daha doğrusu, Strominger ve Vafa'nın -Susskind ile Sen'in daha önceki kavrayışlarından hareketle- elektronik fizik arşivinde "Beckenstein-Hawking entropisinin mikroskobik kökeni" başlıklı bir makale yayınladığı Ocak 1996 tarihine kadar durum böyleydi. Strominger ile Vafa, bu çalışmalarında belli bir grup kara deliğin mikroskobik bileşenlerini tanımlamak ve bunlarla ilişkili entropiyi tam olarak hesaplayabilmek için sicim kuramını kullanmıştı. Çalışmaları, 1980' 1 er ve 1990'ların başında kullanımda olan düzensizlik yaklaşımını kısmen aşma konusunda henüz geliştirilmiş bir imkâna dayanıyordu, buldukları sonuç da Beckenstein ile Hawking'in tahminlerine kesin olarak uyuyor ve 20 yılı aşkın bir süre önce kısmen renklendirilmiş bir tabloyu nihayet tamamlıyordu.

Strominger ile Vafa, *ekstremal* denilen kara deliklere yoğunlaşmıştı. Bu kara delikler yüklüydüler - elektrik yükü diye düşünebilirsiniz. Ayrıca taşıdıkları yük uyarınca minimum bir olası kütleye de sahiplerdi. Bu tanımdan da görülebileceği üzere,

XII. Bölüm'de tartışılan BPS halleriyle yakından ilişkiliydiler. Aslına bakarsanız Strominger ve Vafa, bu benzerliği tam anlamıyla kullanmışlardı. Bir BPS zarları grubu (belli bazı boyutlarda) alıp kesin bir matematiksel plana göre bunları birbirine bağlayarak bazı ekstremal kara delikler inşa edebileceklerini -kuramsal olarak tabi ki- göstermişlerdi. Tıpkı, bir grup kuark ve elektron alıp sonra onları etraflarında elektronların belli bir yörüngede döndüğü protonlar ve nötronlar olarak düzenleyerek bir atom inşa edilebilmesinde -kuramsal olarak tabi ki- olduğu gibi. Strominger ve Vafa da sicim kuramı çerçevesinde yeni bulunmuş bileşenlerden bazılarının, belli bazı kara delikler ortaya çıkarmak için benzer şekilde nasıl bir araya getirilebileceğini göstermişti.

Aslına bakarsanız kara delikler, yıldızlara özgü evrimin olası nihai ürünlerinden biridir. Bir yıldız, milyarlarca yıl süren atomik füzyonla bütün nükleer enerjisini yakıp bitirdiğinde kütle-çekimin içe doğru çeken muazzam kuvvetine dayanacak güce -dışarıyayönelen basınç- sahip değildir artık. Geniş bir koşullar yelpazesinde düşünüldüğünde, bu durum yıldızın muazzam kütlesinin feci bir şekilde içe doğru çökmesine yol açar; kendi muazzam ağırlığı altında şiddetle çöker ve bir kara delik oluşturur. Bu gerçekçi oluşum yolunun tersine, Strominger ve Vafa, "tasarım" kara delikleri savunuyordu. Kara delik oluşumuna ters düşen bir adım atmışlar, ikinci süpersicim devriminde ortaya çıkmış olan zarları titizlikle, yavaş yavaş, kılı kırk yararcasına birbirine ekleyip belli bir kombinasyon oluşturarak nasıl sistematik olarak kara delikler inşa edilebileceğini -kuramcının zihninde- göstermişlerdi.

Bu yaklaşımın önemi çok geçmeden açıklık kazanacaktı. Kara deliklerin mikroskobik düzeyde inşası üzerinde tam bir kuramsal denetim sağlayan Strominger ile Vafa, kara deliklerin mikroskobik bileşenlerinin, bütün gözlenebilir özelliklerini, kütlelerini ve kuvvet yüklerini değişmeden bırakacak şekilde kaç değişik biçimde yeniden düzenlenebileceğini kolayca ve doğrudan sayabiliyorlardı. Sonra da bu sayıyı kara deliğin olay ufkunun alanıyla -Bekenstein ve Hawking'in tahmin ettiği en-tropiyle- karşılaştırıyorlardı. Strominger ve Vafa bunu yaptıklarında arada tam bir uyuşma olduğunu

görmüşlerdi. En azından ekstremal kara delikler açısından, mikroskobik bileşenleri ve ilişkili entropiyi tam olarak açıklamak için sicim kuramını kullanmakta başarılı olmuşlardı. Çeyrek asırlık bir muamma çözülmüştü."

Sicim kuramcılarının birçoğu bu başarıyı, kuramı destekleyen önemli ve inandırıcı bir kanıt olarak görür. Sicim kuramına dair kavrayışımız, diyelim ki bir kuarkm ya da bir elektronun kütlesine dair deneysel gözlemlerle doğrudan ve tam bir bağlantı kurmamıza henüz elvermeyecek kadar zayıftır. Fakat artık sicim kuramının, kara deliklerin daha alışıldık kuramlar kullanan fizikçileri yıllardır çuvallatmış olan, uzun zaman önce ortaya konmuş bir özelliğine dair ilk temel açıklamayı getirdiğini görüyoruz. Kara deliklerin bu özelliği, Hawking'in, kara deliklerin ışıması gerektiği yönündeki tahminiyle, prensipte deneysel olarak ölçülebilir olması gereken bu tahminle yakından bağlantılıdır. Elbette ki böyle bir ölçüm yapabilmek, kesinlikle göklerde bir kara delik bulup yaydığı ışınımı tespit etmekte hassas teçhizatlar kurmamızı gerektirir. Kara delik yeterince hafifse eğer, bir sonraki adım mevcut teknolojinin erimi dahilinde olacaktır. Bu deneysel program henüz başarıya ulaşmamış olsa da, sicim kuramı ile doğal dünya hakkındaki kesin fiziksel ifadeler arasındaki uçurumlar üzerine köprüler kurulabileceğini bir kez daha vurgulamaktadır. Sheldon Glashow -kendisi 1980'lerden sicim kuramının ezeli düşmanıdır- bile kısa zaman önce, "Sicim kuramcıları kara deliklerden bahsettiklerinde, neredeyse gözlenebilir olgulardan bahsetmektedirler; bu da etkileyicidir,"' demiştir.

Kara Deliklerin Henüz Çözülmemiş Gizemleri

Bu etkileyici gelişmeler sonrasında bile kara deliklerin iki önemli gizemi sırrını koruyor. İlki kara deliklerin determinizm kavramı üzerindeki etkisiyle ilgilidir. 19. yüzyılın başında, Fransız matematikçi Pierre-Simon de Laplace, Newton'un hareket yasalarına göre mantıken evrenin saat gibi işliyor olmasının en katı ve uzun erimli sonuçlarından birini telaffuz etmişti:

Belli bir anda, doğaya hayat veren bütün kuvvetleri ve onu oluşturan canlıların durumlarını ayrı ayrı kavrayabilen bir zekâ, bütün bu verileri analiz edebilecek kadar genişse eğer, evrendeki en büyük cisimler ile en hafif atomların hareketlerini aynı formülde birleştirecektir. Böyle bir zekâya göre hiçbir şey belirsiz olmayacaktır, geçmiş gibi gelecek de gözlerinin önüne açıkça serilecektir.

Başka bir deyişle, bir an, evrendeki bütün parçacıkların konumları ile yönlü hızlarını bilirseniz eğer, Newton'un hareket yasalarını kullanarak bu parçacıkların önceki ya da sonraki bir zamandaki konumlarını ve yönlü hızlarını da -en azından prensipte- belirleyebilirsiniz. Bu bakış açısına göre, bütün tezahürler, Güneş'in oluşumundan İsa'nın çarmıha gerilmesinden, gözlerinizin bu sözcük üzerindeki hareketine kadar bütün tezahürler, Büyük Patlama'dan bir an sonra evrendeki parçacık bileşenlerinin kesin konumlarına ve yönlü hızlarına dayanır. Evrenin açılmasıyla ilgili, birbirini izleyen adımlara dayalı bu katı bakış açısı, özgür irade meselesiyle ilgili, insanın zihnini allak bullak ed en envai çeşit ikilemi gündeme getirir, fakat kuantum mekaniğinin keşfiyle birlikte önemi de ciddi oranda azalmıştır. Eleisenberg'in belirsizlik ilkesinin Laplace determinizmini sekteye uğrattığını, çünkü evrenin bileşenlerinin kesin konumlarını ve yönlü hızlarını esasen bilemeyeceğimizi görmüştük. Bu klasik özelliklerin yerini, bir parçacığın şuradaya da burada olma, şu ya da bu yönlü hızda olma olasılığını söyleyen kuantum dalga fonksiyonları alıyordu.

Gelgelelim, Laplace'ın bakış açısının gözden düşmesi, determinizm kavramının paramparça olmasına yol açmadı. Dalga fonksiyonları -kuantum mekaniğinin olasılık dalgaları- zaman içinde, Schrödinger denklemi (ya da Dirac denklemi ve Klein-Gordon denklemi gibi onun daha kesin muadilleri) gibi kesin matematiksel kurallara göre evrilirler. Bu da bize Laplace'ın klasik determinizminin yerini *kuantum determinizminin* aldığını söyler. Zamanda bir anda, evrenin bütün temel bileşenlerinin dalga fonksiyonlarının bilinmesi, "yeterince geniş" bir zekânın önceki ya da sonraki bir zamandaki dalga fonksiyonlarını belirlemesini mümkün kılar. Kuantum determinizmi, belli bir olayın gelecekte seçilmiş bir zamanda

meydana gelmesi olasılığının, tamamen önceki bir zamandaki dalga fonksiyonlarına dair bilgiyle belirlendiğini söyler. Kuantum mekaniğinin olasılıkçı yaklaşımı, kaçınılmazlığı sonuçlardan sonuç-olasılıklarına kaydırarak Laplace determinizmini yumuşatmıştır, fakat sonuç-olasılıkları bildiğimiz kuantum kuramı çerçevesinde gerçekleşir.

Hawking 1976'da, bu yumuşak determinizm biçiminin bile kara deliklerin varlığıyla ihlal edildiğini söylemişti. Bu ifadenin gerisindeki denklemler yine çok çetrefildir, fakat esas fikir hayli doğrudandır. Kara deliğe bir şey düştüğünde, dalga fonksiyonu da kara deliğin içine çekilir. Fakat bu durum, gelecekte bütün zamanlardaki dalga fonksiyonlarını ortaya çıkarma çabamızda, "yeterince geniş" zekâmızın onarılamaz biçimde eksik kalacağı anlamına gelir. Geleceği tam anlamıyla tahmin edebilmek için, bugün bütün dalga fonksiyonlarını bilmemiz gerekir. Fakat bazıları kara deliklerin girdabına düştüyse eğer, içerdikleri bilgi de kaybolmuş demektir.

ilk bakı şta, kara deliklerden kaynaklanan bu zorluk, üzerinde durmaya değermiş gibi görünmeyebilir. Bir kara deliğin olay ufkunun ardındaki her şey, evrenin geri kalanından kopmuş olduğu için, kara deliğin içine düşecek kadar şanssız bir şeyi tamamen görmezden gelsek olmaz mı? Ayrıca felsefi olarak kendi kendimize, evrenin kara deliğin içine düşen şeyin bilgisini aslında kaybetmediğini, bu bilginin biz akılcı varlıkların bedeli ne olursa olsun bakmaktan kaçındığı bir uzay bölgesinde saklı olduğunu söyleyemez miyiz? Hawking kara deliklerin tümüyle kara olmadığını keşfetmeden önce, bütün bu soruların cevabı evetti. Fakat Hawking kara deliklerin ışıdığını tüm dünyaya duyurduğunda hikâye de değişti. Işıma enerji taşır, bu yüzden de bir kara delik ışıdığında kütlesi yavaş yavaş azalır, yavaş yavaş buharlaşır. Böyle devam ederken, deliğin merkezi ile olay ufku arasındaki mesafe yavaş yavaş küçülür, bu küçülme sona erdiğinde, önceden ayrı olan bölgeler kozmik arenaya yeniden dahil olur. Şimdi felsefi düşüncelerimizin müzikle karşı karşıya kalması gerekiyor: Kara deliğin yuttuğu şeylerin içerdiği bilgi -kara deliğin içinde bulunduğunu düşündüğümüz veriler- kara delik buharlaşıp giderken yeniden ortaya çıkar mı? Bu, kuantum determinizminin geçerli

olması için gerekli olan bilgidir, bu yüzden de bu soru, kara deliklerin evrenimizin evrimini çok daha derin bir rastlantı unsuruyla doldurup doldurmadığı sorusunun kalbine uzanmaktadır.

Bu satırlar kaleme alındığı sırada, bu sorunun cevabıyla ilgili olarak fizikçiler arasında bir görüş birliği yoktu. Hawking, yıllar boyunca bu bilginin yeniden ortaya çıkmayacağını iddia etmişti; kara deliklerin bu bilgiyi yok ettiklerini, "böylece fiziğe, kuantum kuramıyla ilişkili olağan belirsizliğin üstünde ve ötesinde yeni bir belirsizlik düzeyi kattıklarını" ileri sürmüştü.’ Aslına bakarsanız Hawking, California Teknoloji Enstitüsünden Kip Thorne'la birlikte, bir kara deliğin içinde kısılıp kalmış bilgiye ne olacağı konusunda yine California Teknoloji Enstitüsü'nden John Preskil1'le bahse tutuşmuştu: Hawking'e Thorne bu bilginin ebediyen kaybolacağını iddia ediyordu, Preskill ise tam tersi bir konum benimsemişti, kara delik ışıyıp küçülürken bu bilginin de yeniden ortaya çıkacağını savunuyordu. Ödül neydi dersiniz? Ödül yine bilgiydi: "Kaybeden(ler) kazanan(lar) a kazanan tarafın tercihi olan bir ansiklopedi alacak."

Bahis bir sonuca bağlanmadı, ama Hawking, kısa bir süre önce, kara deliklerle ilgili olarak sicim kuramı çerçevesinde geliştirilen yeni kavrayışın, yukarıda da tartıştığımız üzere, kara deliğin içine giren bilginin yeniden ortaya çıkmasının bir yolu olabileceğini gösterdiğini kabul etti. Yeni fikir, Strominger ile Vafa'nın ve onların ilk makalelerinden bu yana başka birçok fizikçinin incelediği türde kara delikler söz konusu olduğunda, kara deliğin içindeki bilginin onu oluşturan zarlarda depolandığı ve yeniden ortaya çıkarılabileceği yönündedir. Strominger'in kısa süre önce bu konuda, "Bu görüş bazı sicim kuramcılarının, kara delikler buharlaşırken içlerindeki bilginin de yeniden kazanıldığı iddiasında bulunmasına yol açmıştır. Kanımca bu sonuç, yeterince olgunlaşmamış bir görüş; bunun doğru olup olmadığını görmek için yapılması gereken çok iş var," demiştir. Vafa ise düşüncelerini, "Bu soru karşısında agnostiğim, iki cevap da doğru olabilir," sözleriyle ifade etmiştir. Bu soruyu cevaplamak halihazırda süregiden araştırmaların ana hedeflerinden biridir. Hawking'in de dediği gibi:

Fizikçilerin çoğu, bu bilginin kaybolmadığına inanmak ister, çünkü bu, Dünyayı enıniyetli ve öngörülebilir bir yer kılacaktır. Fakat Einstein'ın genel görelilik kuramını ciddiye alacak olursak, uzay-zamanın düğümler oluşturması, bilginin de katmanlar arasında kaybolması olasılığını görmezden gelmememiz gerektiğine inanıyorum. Bilginin aslında kaybolup olmadığını belirlemek, bugün kuramsal fiziğin en büyük meselelerinden biridir.

Kara deliklerle ilgili henüz çözüme kavuşturulmamış ikinci gizemse deliğin merkezindeki uzay-zamanın niteliğiyle ilgilidir. Genel göreliliğin, 1916'da Schwarzschild'a kadar uzanan doğrudan bir uygulaması, kara deliğin merkezinde birbiriyle çarpışan muazzam kütle ve enerjinin uzay-zamanın dokusunda yıkıcı bir yarığın oluşmasına, bu yarığın da radikal bir kıvrılmayla sonsuz bir kıvrık halini almasına -bir uzay-zaman tuhaflığıyla delinecektir- yol açtığını göstermiştir. Fizikçilerin buradan çıkardığı sonuçlardan biri de şudur: Olay ufkunu aşan maddelerin hepsi kaçınılmaz olarak kara deliğin merkezine doğru çekildiğinden ve burada da maddenin hiçbir geleceği olmadığından, kara deliğin kalbinde zaman son bulmaktadır. Yıllardır Einstein'ın denklemlerini kullanarak kara deliklerin merkezine özgü özellikleri incelemiş olan fizikçiler, çılgınca bir olasılığı, bunun, bir kara deliğin merkezi üzerinden bizim evrenimize hafifçe bağlanmış bir evrene açılan bir kapı olması olasılığını ortaya koymuşlardır. Kabaca söyleyecek olursak, bizim evrenimizde zamanın son bulduğu yerde, bizimkiyle bağlantılı başka bir evrende zaman daha yeni başlar.

Bu kafa karıştırıcı olasılığın bazı etkilerini gelecek bölümde ele alacağız, fakat şimdi, önemli bir noktayı vurgulamak istiyoruz. Temel dersi hatırlamamız gerekiyor: Elayal edilemeyecek kadar büyük bir yoğunluğa yol açan devasa kütleye ve küçük boyutlara sahip uç noktalar, Einstein'ın kuramının kullanılmasını geçersiz kılarken, kuantum mekaniğinin kullanılmasını gerektirir. Bu da bizi şu soruya götürüyor: Sicim kuramının, kara deliğin merkezindeki uzay-zaman tuhaflığı hakkında ne söylemesi gerekir? Bu mesele, bugün yoğun araştırmalara konu olmaktadır, fakat bilgi kaybı meselesinde olduğu gibi henüz çözüme kavuşturulmamıştır. Sicim kuramı çok çeşitli

başka tuhaflıklarla da ustalıkla uğraşmaktadır: XI. Bölüm'de ve bu bölümün ilk kısmında tartışmış olduğumuz, uzaydaki delikler veyırtılmalar.Fakat bir tek tuhaflık gördüyseniz, *hepsini* görmüş sayılmazsınız. Evrenimizin dokusu çok çeşitli biçimlerde delinebilir, yırtılabilir. Sicim kuramı, bu tuhaflıkların bazılarına dair bize güçlü fikirler vermiştir, fakat diğerleri, kara deliklerin tuhaflığı da dahil olmak üzere, sicim kuramcılarının elinden kaçmıştır. Bunun esas sebebi yine sicim kuramının, yaklaşıklıkları kara deliklerin en derinindeki noktada neler olup bittiğini eksiksiz ve güvenilir bir biçimde analiz etme becerimizi gölgeleyecek olan tedirginlik araçlarına dayanmasıdır.

Fakat tedirginlik çerçevesine dahil olmayan yöntemlerde son dönemde inanılmaz bir ilerleme kaydedilmiş ve bu yöntemlerin kara deliklerin başka yaklaşımlarına başarılı bir biçimde uygulanmış olmasına bakılırsa, sicim kuramcıları kara deliklerin merkezinde yatan sırların çok uzak olmayan bir gelecekte çözüleceği konusunda büyük ümitlere sahiptir.

XIV. Bölüm

Kozmoloji Üzerine Düşünceler

Tarih boyunca insanlar, tutkulu bir şekilde evrenin kökenini anlama isteği duymuşlardır. Kültürel ve zamansal farklılıkları böyle aşan, kadim atalarımızın hayal gücü kadar, modern kozmoloğun araştırmalarına da ilham kaynağı olan başka bir soru daha yoktur herhalde. Derinlerde bir yerde, neden bir evrenin var olduğu, nasıl olup da tanıklık ettiğimiz biçimi aldığı ve evrimini yönlendiren mantığın -ilkenin- ne olduğu sorularına getirilecek bir açıklamaya özlem duyuyoruz. Şaşırtıcı olan şu ki, insanlık artık bu soruların bazılarını bilimsel olarak cevaplamayı sağlayan bir çerçevenin ortaya çıkmaya başladığı bir noktaya gelmiş bulunuyor.

Bugün kabul gören bilimsel yaratılış kuramı, evrenin ilk zamanlarında en uç koşulları -muazzam enerji, sıcaklık ve yoğunluk- yaşadığını söylüyor. Artık bildik olan bu koşullar, hem kuantum mekaniğinin hem kütleçekiminin dikkate alınmasını gerektirmekte; bu nedenle, evrenin doğuşu süpersicim kuramının getirdiği kavrayışları deneyebileceğimiz sağlam bir zemin oluşturmaktadır. Bu yeni kavrayışları kısaca ele alacağız, ama önce, genelde *standart kozmoloji modeli* olarak anılan, sicim kuramı öncesine ait kozmolojik hikâyeyi yeniden özetleyelim.

Standart Kozmoloji Modeli

Kozmik kökenlere ilişkin modern kuramın başlangıcı, Einstein'ın genel görelilik kuramını tamamlamasından 15 yıl sonrasına uzanır. Einstein, kendi fikirlerinin kuramsal değerini ve bunların evrenin sonsuz ve durağan olmadığına işaret ettiğini kabul etmeye yanaşmamış olsa da, Alexander Friedmann bunu yaptı. IIL Bölüm'de tartıştığımız gibi, Friedmann, Einstein'ın denklemleriyle ilgili, Büyük Patlama olarak bilinen çözümü geliştirdi. Evrenin sonsuz bir sıkışma durumundan şiddetle doğduğunu ve bu ilk patlama sonrasında halen

genişlemekte olduğunu söylüyordu bu çözüm. Einstein böyle zamanla değişen çözümlerin kendi kuramının sonucu olmadığından o kadar emindi ki, Friedmann'ın çalışmasında vahim bir hata bulduğunu anlatan bir makale yayınladı. Fakat sekiz ay kadar sonra Friedmann, Einstein'ı aslında hata olmadığına ikna etmeyi başardı. Einstein alenen ama ters bir şekilde itirazını geri aldı. Gerçi Einstein'ın, Friedmann'ın sonuçlarının evrenle bir ilgisi olabileceğini düşünmediği açıktır. Fakat yaklaşık beş yıl sonra Elubble'ın, Wilson Dağı Rasathanesi'nde yüz inçlik teleskobuyla birkaç düzine galaksiye ilişkin yaptığı ayrıntılı gözlemler, evrenin gerçekten de genişlediğini doğruladı. Friedmann'ın çalışması, fizikçiler Eloward Robertson ve Arthur Walker tarafından daha sistematik ve etkili bir biçimde yenilenmiş haliyle modern kozmolojinin temelini oluşturmaktadır.

Kozmik kökenlerle ilgili modern kuramı biraz daha ayrıntılı şekilde şöyle özetleyebiliriz: Yaklaşık 15 milyar yıl önce, evren muazzam derecede enerjik bir olayla patlayarak meydana geldi. Bütün uzayı ve bütün maddeyi püskürten bir olaydı bu. (Büyük Patlama'nın nerede gerçekleştiğini bulmak için çok uzaklara gitmenize gerek yoktur; çünkü bu olay başka yerlerde olduğu kadar şimdi bulunduğunuz yerde de gerçekleşti. Başlangıçta, bugün birbirinden ayrı gördüğümüz bütün yerler, *aynı* yerdi.) Hesaplandığı kadarıyla Büyük Patlama'dan sadece 10^{-43} saniye sonra, yaygın deyişle *Planck zamanı* sonrasında, evrenin sıcaklığı, 10^{32} Kelvin'di, yani Güneş'in kızgın derinliklerinin 10 trilyon kere trilyon katı daha sıcaktı. Zaman geçtikçe evren genişleyip soğudu ve bunlar olurken baştaki homojen ve kaynar sıcaklıktaki ilk kozmik plazmada girdaplar ve kümelenmeler oluşmaya başladı. Büyük Patlama'nın üstünden bir saniyenin yüz binde biri kadar bir zaman geçtiğinde, her şey kuarkların üçlü gruplar halinde bir araya gelip protonlar ve nötronları oluşturmasına elverecek kadar soğumuştu; sıcaklık yaklaşık 10 trilyon Kelvin'e inmişti, yani Güneş'in iç kısımlarından bir milyon kat daha sıcaktı. Büyük Patlama'dan sonra saniyenin yüzde biri kadar bir zaman geçtiğinde, periyodik tablodaki en hafif bazı elementlerin çekirdeklerinin, soğuyan parçacıkların plazmasında pıhtılaşmaya başlamasına elverecek koşullar oluşmuştu. Sonraki üç dakika içinde,

kaynayan evren soğuyup yaklaşık bir milyar derece sıcaklığa indiğinde ortaya çıkan çekirdekler çoğunlukla, hidrojen ve helyum çekirdekleri yanı sıra eser miktarda döteryum ("ağır" hidrojen) ve lityum çekirdekleriydi. Bu, *ilk nükleosentez* evresi olarak bilinir.

Sonraki birkaç yüz bin yıl boyunca daha fazla genişleme ve soğuma dışında bir şey olmadı. Ama sonra, sıcaklık birkaç bin dereceye düştüğünde, çılgınca kaynaşan elektronlar yavaşladı ve hızları, çoğu hidrojen ve helyum olan atom çekirdeklerinin kendilerini yakalayabileceği, böylece elektriksel olarak ilk nötral atomları oluşturabileceği noktaya indi. Bu, çok önemli bir andı: Bu noktadan sonra evren genel olarak şeffaflık kazandı. Elektron yakalanması devri öncesinde, evren elektrik yüklü parçacıklardan oluşan yoğun bir plazmayla doluydu ve bu parçacıkların bazıları, örneğin çekirdekler pozitif yüklüydü, bazıları ise, örneğin elektronlar negatif yüklüydü. Yalnızca elektrik yüklü nesnelerle etkileşim kuran fotonlar, yüklü parçacık yağmuru altında bu parçacıklarla sürekli çarpışıyor ve yollarından sapmadan ya da soğurulmadan yol almaları pek mümkün olmuyordu. Fotonların serbestçe hareket etmesinin önündeki yüklü parçacık engeli, evrenin neredeyse tamamen mat bir görünüme bürünmesine yol açmış olabilir, tıpkı sabahleyin yoğun bir siste ya da insanı kör eden, tozlu bir kar fırtınasında yaşamış olabileceğiniz gibi. Fakat negatif yüklü elektronlar pozitif yüklü çekirdeklerin etrafında yörüngeye girip elektrik yüklü nötral atomları ortaya çıkardığında, yüklü engeller kaybolup gitti ve yoğun sis ortadan kalktı. Bundan sonra, Büyük Patlama'da ortaya çıkan fotonlar hiç engellenmeden yol aldılar ve evrenin genişlemesi de gittikçe görünür hale geldi.

Yaklaşık bir milyar yıl sonra, evrenin o çılgın başlangıçlarının ardından büyük ölçüde sakinleşmesiyle birlikte galaksiler, yıldızlar, sonunda gezegenler ortaya çıkmaya başladı. Kütle çekiminin bir araya getirdiği ilk element yığınlarıydı bunlar. Bugün, Büyük Patlamanın ardından yaklaşık 15 milyar yıl sonra, hem evrenin ihtişamını hem de kozmik kökenlere dair makul ve deneysel olarak sınanabilir bir kuramı parça parça bir araya getirmiş olma becerimizi hayretle karşılayabiliyoruz.

Peki, Büyük Patlama kuramına *gerçekten* ne kadar güvenmeliyiz?

Büyük Patlamayı Sınamak

Gökbilimciler en güçlü teleskoplarla evreni izleyip galaksilerin ve kuasarların Büyük Patlama'dan birkaç milyar yıl sonra yaydığı ışığı görebiliyorlar. Bu, onların Büyük Patlama kuramının öngördüğü evrenin genişlemesini, evrenin ilk zamanlarına dek geriye uzanarak doğrulamalarına imkân tanır, her şey bir "T'ye uyar. Kuramın daha önceki zamanlar açısından geçerliliğini sınamak için fizikçiler ve gökbilimciler daha dolaylı yöntemler kullanmak zorundadır. En ayrıntılı yaklaşımlardan biri *kozmik arkaplan ışınımı* olarak bilinen şeyi içerir.

İyice şişirdikten sonra bir bisiklet lastiğine dokunduysanız, sıcak geldiğini bilirsiniz. Bunun sebebi, sıkıştırıldıklarında şeylerin ısınmasıdır. Örneğin düdüklü tencerelerin ardında yatan ilke budur. Bu tencerelerde sıradan olanların ulaşabildiklerine kıyasla çok yüksek sıcaklıklara çabucak ulaşılabilmesi için, hava kapalı ortam içinde iyice sıkıştırılır. Tersi de geçerlidir: Basınç serbest bırakıldığında ve şeylerin genleşmesine izin verildiğinde soğuma da beraberinde gelir. Düdüklü tencerenin kapağı kaldırılacak olsa -ya da daha ilginci, tencere patlayacak olsa- içindeki hava soğuyup standart oda sıcaklığına inerken, genleşip olağan yoğunluğuna ulaşacaktır. Isınmış bir ortamı "soğutmaya" yönelik tanıdık bir tekniği anlatan "istim salma" deyiminin ardındaki bilim işte budur. Öyle anlaşılıyor ki, Dünyaya dair bu basit gözlemler, evrende derinlikli bir biçimde vücut bulmaktadır.

Yukarıda gördüğümüz gibi, elektronlar ve çekirdeklerin birleşip atomları oluşturması sonrasında fotonlar, tıpkı sıcak fakat boş bir düdüklü tencerenin içindeki atomlar gibi serbest kalarak, evrende engelsiz bir şekilde hareket eder. Kapağını kaldırıp düdüklü tencerenin içindeki havanın genleşmesine izin verdiğinizde içerideki havanın soğumasında olan şey, aynı şekilde evren genişlerken içinde akıp duran foton "gazı" için de geçerlidir. Aslına bakarsanız, 1950'lerde George Garnow ile öğrencileri Ralph Alpher ve Robert

Hermann ve 1960'ların ortalarında Robert Dicke ile Jim Peebles gibi eski fizikçiler, kozmik genişlemenin son 15 milyar yılı içinde soğuyup mutlak sıfırın birkaç derece üstünde bir sıcaklığa erişen bu ilk fotonlardan oluşan neredeyse yeknesak bir yağmurun, bugünkü evrenin her yerine sızmış olması gerektiğini fark ettiler. 1965'te, New Jersey'deki Bell Laboratuvarları'ndan Arno Penzias ile Robert Wilson, iletişim uydularında kullanılması amaçlanmış bir anten üzerinde çalışırlarken Büyük Patlama sonrasındaki bu parlamayı tespit ettiklerinde, zamanımızın en önemli keşiflerinden birini tesadüfen gerçekleştirmiş oluyorlardı. Bundan sonraki araştırmalar kuramı da deneyleri de derinleştirdi ve 1990'ların başında Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesine (NASA) ait Kozmik Arkaplan Kâşifi (COBE) adlı uydunun yaptığı ölçümlere varıldı. Bu verilerle birlikte fizikçiler ve gökbilimciler, evrenin, sıcaklığı Büyük Patlama kuramının beklentileriyle tam olarak örtüşen biçimde, mutlak sıfırın yaklaşık 2,7 derece üstünde mikrodalga ışınımla dolu *olduğunu* büyük bir kesinlikle doğruladılar (gözlerimiz mikrodalgalara duyarlı olsaydı etrafımızdaki dünyaya bir parlaklığın yayılmış olduğunu görürdük). Somut bir şekilde ifade edecek olursak, şu an işgal etmekte olduğunuz da dahil evrenin *her* metrekübünde o engin mikrodalga ışınım denizinin bir parçası olan 400 milyon foton bulunmaktadır; bu, yaratılışın bir yankısıdır. Kabloyu çıkardığınızda ve yayın saati dolmuş bir kanala ayarladığınızda, televizyonun ekranında beliren "karlanma"nın bir kısmı aslında Büyük Patlama sonrasındaki bu sönük ortamdan dolayıdır. Kuram ile deney arasındaki bu uyuşma, kozmolojinin çizdiği Büyük Patlama tablosunu fotonların patlamadan birkaç yüz bin yıl sonra evrende serbestçe hareket etmeye başladığı ilk zamanlara dek geri uzanarak doğrulamaktadır.

Büyük Patlama kuramıyla ilgili testlerimizin kapsamını daha da önceki zamanlara doğru genişletebilir miyiz? Evet, bunu yapabiliriz. Fizikçiler, nükleer kuramın ve termodinamiğin standart ilkelerini kullanarak, ilk nükleosentez döneminde, yani Büyük Patlamanın bir saniyenin yüzde biri kadar sonrası ile birkaç dakika sonrası arasındaki zaman diliminde ortaya çıkan ışık unsurlarının göreli bolluğuyla ilgili kesin tahminlerde bulunabilirler. Örneğin nükleer kurama göre, evrenin yüzde 23'ünün helyumdan oluşuyor olması

gerekiyor. Gökbilimciler yıldızlar ve nebulalarda bol miktarda bulunan helyum miktarını ölçerek gerçekten de bu tahminin doğru olduğuna işaret eden, etkileyici veriler toplamışlardır. Döteryum bolluğuyla ilgili tahmin ve bunun doğrulanması, herhalde daha etkileyicidir, çünkü döteryumun evrende az miktarda fakat kesin olarak bulunmasını açıklayan, Büyük Patlama dışında başka bir astrofiziksel süreç yoktur esasen. Bu maddelerle birlikte daha yakın dönemde lityumun evrendeki bolluğunun doğrulanışı, bunların ilk sentezlenme zamanlarına dek geriye uzanan, evrenin başlangıcına ait fiziği kavrayışımızın hassas bir sınamasıdır.

Tüm bunlar, bizi neredeyse kibre sürükleyecek derecede etkileyicidir. Sahip olduğumuz bütün veriler, evreni Büyük Patlama'nın bir saniyenin yüzde biri kadar sonrasından şimdiye, 15 milyar yıl sonrasına kadar betimleyebilen bir kozmoloji kuramını doğrulamaktadır. Yine de, yeni doğmuş evrenin olağanüstü bir hızla evrildiği gerçeğini gözden kaçırmamamız gerekiyor. Bir saniyenin küçük parçaları -yüzde birinden *çok* daha küçük parçalar- dünyamızın kalıcı özelliklerinin ilk kez ortaya çıktığı kozmik devirleri biçimlendirir. Böylece, fizikçiler sürekli artan bir çabayla, evrenin başlangıcına çok daha yakın zamanları açıklamaya çalışmışlardır. Biz daha geriye yöneldikçe, evren daha da küçüldüğü, ısındığı ve yoğunlaştığı için, madde ve kuvvetlere ilişkin, kuantum mekaniğine özgü geçerli bir betimleme yapabilmek giderek daha önemli hale gelmektedir. Daha önceki bölümlerde başka bakış açılarıyla gördüğümüz gibi, nokta-parçacıklara dayalı kuantum alan kuramı ancak ve ancak tipik parçacık enerjileri Planck enerjisi civarında olduğu sürece işe yaramaktadır. Kozmolojik bir bağlamda, bu durum bilinen evrenin tamamı Planck büyüklüğü ölçülerinde bir topağın içine sığdırıldığında ortaya çıkar ve böylece öyle büyük bir yoğunluk söz konusu olur ki, aydınlatıcı bir benzetme bulmak güç: Basitçe, evrenin Planck zamanındaki yoğunluğu *devasadır.* Bu enerjilerde ve yoğunluklarda, kütleçekimi ve kuantum mekaniği, nokta-parçacıklara dayalı kuantum alan kuramında olduğu gibi artık iki ayrı eleman olarak ele alınamaz. Bu kitabın vermek istediği temel mesaj da, bu muazzam enerjilerde ve bunların ötesinde, sicim kuramına başvurmamız gerektiğidir. Zamanla ilgili terimlerle ifade edecek

olursak, Büyük Patlamanın 10^{-41} saniye sonrasına denk gelen Planck zamanından öncesini araştırmaktayız, dolayısıyla en baştaki bu devir, sicim kuramının kozmolojik arenasıdır.

Şimdi bu devire uzanalım, ama önce, standart kozmolojinin, evrenin Büyük Patlama'dan sonra Planck zamanı ile bir saniyenin yüzde biri sonrası arasında kalan zaman dilimindeki hali hakkında neler söylediğine bakalım.

Planck Zamanından, Büyük Patlamanın Bir Saniyenin Yüzde Biri Sonrasına

VII. Bölüm'e (özellikle de Şekil 7.1'e) dönüp kütleçekimi dışındaki üç kuvvetin evrenin ilk dönemindeki son derece sıcak ortamında birleşiyormuş gibi göründüğünü hatırlayalım. Fizikçilerin bu kuvvetlerin güçlerinin enerji ve sıcaklıkla birlikte nasıl değiştiği üzerine hesapları, Büyük Patlama'dan sonraki 10^{-35} saniyenin öncesinde, güçlü, zayıf ile elektromanyetik kuvvetin tek bir "birleşik büyük" ya da "süper" kuvvet olduğunu göstermektedir. Bu haliyle evren, bugün olduğundan çok daha simetrikti. Birbirinden farklı metaller ısıtıldığında ortaya çıkan eriyiğin homojenliğinde olduğu gibi, bugün gözlediğimiz haliyle kuvvetler arasındaki ciddi farklılıklar da evrenin ilk zamanlarında karşılaşılan sıcaklık ile enerjinin uç noktalarda olması *yüzünden* siliniyordu. Kuantum alan kuramının biçimselliği, evren zamanla genişleyip soğudukça bu simetrinin de daha çok, aniden gerçekleşen pek çok adımla keskin bir biçimde azaldığını ve nihayet bugün aşina olduğumuz nispeten asimetrik biçime vardığını göstermiştir.

Simetrinin bu biçimde azalmasının ya da daha somut bir deyişle *simetri kırılması* olarak adlandırılan şeyin altında yatan fiziği anlamak zor değildir. Suyla dolu büyük bir kap düşünelim. H_2O molekülleri kabın her tarafına eşit düzeyde yayılmıştır, hangi açıdan bakılırsa bakılsın su aynı görünür. Şimdi ise, bir yandan sıcaklığı düşürürken kabı izleyelim. Başta pek fazla bir şey gerçekleşmez. Mikro ölçeklerde su moleküllerinin ortalama hızı azalır, fakat olup biten neredeyse bundan ibaret gibidir. Fakat sıcaklığı 0 dereceye

indirdiğimizde, önemli bir şeyin meydana geldiğini görürüz. Sıvı su donmaya başlar ve katı buza dönüşür. Önceki bölümde tartıştığımız gibi bu, bir faz geçişinin basit bir örneğidir. Buradaki amacımız açısından belirtilmesi gereken önemli nokta, bu faz geçişinin H_2O moleküllerinin gösterdiği simetri miktarında bir azalmaya yol açtığıdır. Hangi açıdan bakılırsa bakılsın sıvı su aynı görünse de -dönüşümlü olarak simetrik görünür- katı buz farklıdır. Buzun kristalleşmiş bir blok yapısı vardır, bu da yeterince keskin bir biçimde incelenirse, bütün kristaller gibi buzun da farklı açılardan farklı görüneceği anlamına gelir. Faz geçişi, apaçık olan dönüşümlü simetri miktarında bir azalmayayol açmıştır.

Aşina olduğumuz tek bir örneği tartışmış olsak da, bahsettiğimiz nokta daha genel olan için geçerlilik taşımaktadır: Birçok fiziksel sistemde, sıcaklığı azalttığımızda, bir noktada, önceki simetrilerin bir bölümünün azalması ya da "kırılması"na yol açan bir faz geçişi yaşanır genellikle. Aslına bakarsanız, sıcaklığı yeterince geniş bir aralıkta değiştirilirse, bir sistem bir dizi laz geçişi yaşayabilir. Su, verilebilecek basit bir örnektir yine. Sıcaklığı 100 derecenin üstüne yükseltilecek olursa, su artık gaz olup buharlaşır. Bu biçimde, sistem sıvı fazda olduğundan daha fazla simetriye sahiptir; çünkü artık tek tek H_2O molekülleri sıkışık ve birbirlerine yapışık oldukları sıvı biçiminden kurtulmuştur. Birbirleriyle tamamen eşit bir biçimde, molekül gruplarının diğerlerini dışarıda bırakarak yakın birliktelikler kurmak için birbirlerini seçtiği topluluklar ya da "klikler" oluşturmaksızın kabın içinde dolanırlar. Yeterince yüksek sıcaklıklarda moleküler serbestlik baskındır. Sıcaklığı 100 derecenin altına düşürdüğümüzde, bir gaz-sıvı faz geçişi yaşadığımız için, elbette su damlaları biçim kazanır ve simetri azalır. Devam edip daha düşük sıcaklıklara inecek olursak, 0 dereceyi geçene kadar çok önemli bir şey gerçekleşmez. 0 derecede, yukarıda gördüğümüz gibi, sıvı su-katı buz faz geçişi simetride bir başka ani azalmayayol açar.

Fizikçiler Büyük Patlama'dan sonra Planck zamanı ile bir saniyenin yüzde biri sonrası arasında kalan zaman diliminde evrenin de çok benzer bir davranış gösterdiğine ve buna benzer en az iki faz geçişi yaşadığına inanmaktadır. 10^{28} Kelvin'in üstünde kalan

sıcaklıklarda, kütleçekimi dışındaki üç kuvvet tek bir kuvvetmiş ve olabildiğince simetrikmiş gibi görünüyordu. (Bu bölümün sonunda, sicim kuramının kütleçekimini bu yüksek sıcaklıktaki birleşmeye nasıl dahil ettiğini ele alacağız.) Fakat sıcaklık, 10^{28} Kelvin'in altına düştüğünde, evren üç kuvvetin ortak birlikleri içinden farklı biçimlerde kristalleştiği bir faz geçişine maruz kaldı. Kuvvetlerin göreli güçleri ve madde üzerindeki etkilerinin ayrıntıları farklılaşmaya başladı. Böylece evren soğurken, kuvvetlerin yüksek sıcaklıklardaki açık simetrisi kırıldı. Yine de Glashow, Salam ve Weinberg'un çalışmaları (bkz. V. Bölüm) yüksek sıcaklıkta simetrinin tümüyle silinmediğini göstermektedir: Zayıf ve elektromanyetik kuvvetler hâlâ ayrışmamış bulunuyordu. Evren daha fazla genişleyip soğuyarak, şeylerin sıcaklığı 10^{15} Kelvin'e -Güneş'in çekirdeğindeki sıcaklığın 100 milyon katı- ininceye dek, yani evren elektromanyetik ve zayıf kuvvetleri etkileyen başka bir faz geçişine girinceye dek fazla bir şey gerçekleşmedi. Bu sıcaklıkta zayıf ve elektromanyetik kuvvetler de, önceki daha simetrik birliklerinden ayrılıp kristalleşti ve evren soğumaya devam ettikçe bu kuvvetler arasındaki farklılık da büyüdü. Kozmik tarihe ilişkin bu özet bilgiler her ne kadar bu kuvvetlerin aslında birbirleriyle derinden ilişkili olduğunu gösterse de, dünyamızda faal olan, birbirinden belirgin biçimde farklı, kütleçekimi dışındaki üç kuvvetten bu iki faz geçişi sorumludur.

Kozmolojik Bir Bilmece

Bu Planck-dönemi sonrası kozmolojisi, evreni, Büyük Patlama sonrasındaki kısacık anlara dönerek anlamaya yönelik, zarif, tutarlı ve hesaplarla izlenebilir bir çerçeve sunmaktadır. Fakat başardı kuramların çoğunda olduğu gibi, yeni kavrayışlarımız çok daha ayrıntılı sorular gündeme getiriyor. Öyle anlaşılıyor ki, bu soruların bir kısmı, sunulduğu biçimiyle standart kozmoloji senaryosunu geçersiz kılmasa da, daha derinlikli bir kuram gereksinimine işaret eden tuhaf yönleri aydınlatmaktadır. Gelin bunlardan birine odaklanalım şimdi. Buna *ufuk problemi* denmektedir ve modern kozmolojinin en önemli konularından biridir.

Detaylı kozmik arkaplan ışınımı araştırmaları göstermiştir ki, ölçüm anteni ne yöne çevrilirse çevrilsin, hata payı 100.000'de 1 olmak üzere, ışınımın sıcaklığı aynıdır. Durup bir düşünüldüğünde, bunun çok tuhaf bir durum olduğu görülecektir. Evrende, aralarında muazzam mesafeler bulunan yerler neden birbirine bu kadar yakın sıcaklıklara sahip olsun ki? Bu bilmecenin görünürde doğal bir çözümü olarak, evet, gökyüzünde birbirine taban tabana zıt iki yer bugün birbirinden çok uzak olsa da, tıpkı ikizlerin doğum sırasında ayrılmasında olduğu gibi, evrenin ilk zamanlarında birbirlerine çok yakındı, denilebilir. Ortak bir başlangıç noktasından doğdukları için, sıcaklık gibi ortak özelliklere sahip olmaları o kadar da şaşırtıcı değildir.

Standart Büyük Patlama kozmolojisinde, bu iddia geçerli olamamaktadır. Nedenini şöyle açıklayabiliriz: Sıcak bir kap çorba yavaş yavaş soğuyarak odanın sıcaklığına uyum sağlar, çünkü etrafındaki soğuk havayla temas halindedir. Yeterince uzun bir süre beklenirse, çorbanın sıcaklığıyla havanın sıcaklığı temas yoluyla aynı olacaktır. Ama çorba bir termosun içindeyse, sıcaklığını daha uzun süre korur elbette; çünkü dıştaki ortamla iletişimi daha azdır. Bu da, iki cismin sıcaklıklarının eşitlenmesinin, aralarında uzun süreli ve bozulmayan bir ilişki bulunmasına bağlı olduğunu göstermektedir. Uzayda, bugün çok uzun mesafelerle ayrılmış yerlerin ilk temasları yüzünden aynı sıcaklığa sahip olduğu iddiasını sınamak için, evrenin ilk zamanlarında bu yerler arasındaki bilgi alışverişinin etkinliğini incelememiz gerekmektedir. Başta, bu yerler birbirine ilk zamanlarda daha yakın olduğundan, aralarında iletişimin daha kolay olduğunu düşünebiliriz. Fakat uzamsal yakınlık, hikâyenin bir parçasıdır yalnızca. Hikâyenin diğer parçasıysa zamansal süreklilikti̇r.

Bunu daha etraflıca irdeleyebilmek için kozmik genişlemeyle ilgili bir "filmi" incelediğimizi düşünelim, ama filmi tersinden, bugünden Büyük Patlamaya doğru geri sararak oynatalım. Işık hızı herhangi bir sinyal ya da bilginin, ne kadar hızlı yol alacağına bir sınır getirdiğinden, belli bir anda aralarındaki mesafenin, ancak ışığın Büyük Patlama'dan beri almış olabileceği mesafeden kısa olması koşuluyla uzayın iki ayrı bölgesindeki maddeler arasında ısı enerjisi

alışverişi gerçekleşebilir ve böylece bu bölgelerdeki madde aynı sıcaklığa gelme olanağına sahip olabilir. Sonuç olarak, filmi geriye sardıkça uzay bölgelerinin ne ölçüde yakınlaşacağı ile bu noktaya varmaları için saati ne kadar geriye alacağımız arasında bir rekabet olduğunu görmekteyiz. Örneğin, uzayda iki konum arasında 300.000 km mesafe olması için, filmi, Büyük Patlama'nın bir saniyeden daha kısa bir süre sonrası süresince sarmamız gerekecektir; bu durumda birbirlerine daha yakın olsalar da, hâlâ hiçbir şekilde birbirleri üzerinde etkili olamazlar, çünkü ışığın aralarındaki mesafeyi kat edebilmek için tam bir saniye daha yol alması gerekecektir. İki konum arasındaki mesafenin çok daha az, diyelim ki 300 km olması için, filmi Büyük Patlama'nın ardından bir saniyenin binde biri sonrası süresince sarmamız gerekecektir ki, bu durumda yine aynı sonuca varırız. Söz konusu iki konum birbirini yine etkileyemez, çünkü bir saniyenin binde biri kadar bir sürede ışık 300 km'lik bir yolu kat edemez. Aynı şekilde devam ederek, iki konum arasındaki mesafenin yaklaşık 30 cm olması için filmi Büyük Patlama'nın ardından bir saniyenin milyarda biri sonrası süresince sardığımızda da yine birbirini etkileyemezler, çünkü ışığın Büyük Patlama sonrasında bu iki konum arasındaki yaklaşık 30 cm'yi kat etmeye yeterince zamanı yoktur. Bu, Büyük Patlamaya doğru geri gidildikçe evrendeki iki nokta giderek birbirine yaklaşacağı için, çorba ile hava arasında olduğu gibi, aralarında onları aynı sıcaklığa getirecek zorunlu bir ısıl temasın bulunamayacağını göstermektedir.

Fizikçiler, standart Büyük Patlama modelinde tam da böyle bir sorunun ortaya çıktığını göstermişlerdir. Ayrıntılı hesaplar, halihazırda birbirinden çok uzaktaki uzay bölgeleri arasında, aynı sıcaklıkta olmalarını açıklayacak bir ısı enerjisi alışverişi gerçekleşmiş olmasının mümkün olmadığını göstermektedir.

Ufuk sözcüğü, ne kadar uzağı görebileceğimizi, yani ışığın ne kadar yol alabileceğini ifade ettiğinden, fizikçiler kozmosun devasa genişlikteki alanının heryerinde sıcaklığın açıklanamaz bir biçimde aynı olmasına "ufuk problemi" demişlerdir. Bu muamma, standart kozmoloji modelinin yanlış olduğu anlamına gelmemektedir. Fakat sıcaklığın aynı olması, güçlü bir ihtimalle kozmolojik hikâyenin

önemli bir parçasını gözden kaçırdığımıza işaret etmektedir. Halen Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde araştırmalarını sürdüren fizikçi Alan Guth, 1979'da hikâyenin bu kayıp bölümünü yazdı.

Şişirme

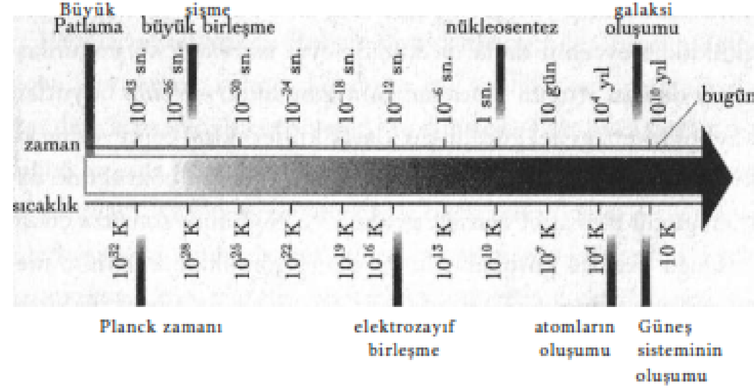
Ufuk probleminin temelinde, evrende birbirinden çok uzak iki bölgeyi birbirine yaklaştırabilmemiz için, kozmik filmi zamanın başlangıcına doğru geri sarmamızın gerekliliği yatar. Aslında, o kadar geriye dönüldüğünde bir fiziksel etkinin bir bölgeden diğerine gitmesine yetecek kadar zaman geçmez. Dolayısıyla buradaki güçlük, biz kozmolojik filmi geriye sarıp Büyük Patlamaya yaklaştıkça, evrenin yeterince hızlı bir oranla küçülmemesidir.

Evet, ana fikir kabaca budur, fakat betimlemeyi biraz daha netleştirmek için çabalamaya değer. Ufuk probleminin kaynağı, tıpkı bir topun yukarıya atılmasında olduğu gibi, kütleçekimin çekici kuvvetinin evrenin genişleme hızının *yavaşlamasına* yol açmasıdır. Bu da örneğin, kozmosta iki yer arasındaki mesafeyi yarı yarıya indirmek için, filmi başlangıca doğru yarıdan fazla geri sarmamız gerektiği anlamına gelmektedir. Gördüğümüz gibi, mesafeyi yarı yarıya indirmek için Büyük Patlama'dan sonra geçen zamanın yarısından fazlasını geriye sarmamız gerekiyor. Orantısal olarak, Büyük Patlamanın üstünden daha az zaman geçmesi, birbirlerine yaklaşsalar bile iki bölge arasında etkileşim olmasının *daha zor* olduğu anlamına gelmektedir.

Guth'un ufuk problemine getirdiği çözümü artık basit bir dille ifade edebiliriz. Guth, Einstein'ın denklemleriyle ilgili başka bir çözüm geliştirmiştir. Buna göre, evrenin ilk zamanlarında kısa süren, muazzam hızlı bir genişleme evresi yaşanır ve aslında, evrenin beklenmedik derecede hızlı artan bir genişlemeyle, gittikçe "şiştiği" bir evredir bu. Bir topun havaya atıldıktan sonra yavaşlaması örneğinde olduğunun tersine, giderek artan bir hızla genişleme, ilerledikçe *daha da hızlanır.* Kozmik filmi geri sardığımızda, hızla ivme kazanan genişleme, hızla sürati kesilen büzülmeye dönüşür. Bu da kozmosta iki yer arasındaki mesafeyi yarıya indirmek için (hızın

giderek arttığı genişleme evresinde) filmi yarısından daha az -aslında çok daha az- sarmamız gerektiği anlamına gelir. Filmi daha az geriye sarmamız, iki bölgenin ısıl iletişim kurmak için daha fazla zamanı olması anlamına gelir; tıpkı sıcak çorba ve hava örneğinde olduğu gibi aynı sıcaklığa varmak için yeterince zamanları olacaktır.

Guth'un keşfi ve halen Stanford Üniversitesinde araştırmalarını sürdüren Andre Linde ile o sıralarda Pennsylvania Üniversitesi'nde çalışan Paul Steinhardt ve Andreas Albrecht'in yanı sıra başka birçok fizikçinin bu keşfe yaptığı katkılar sayesinde, standart kozmoloji modeli gelişerek, *şişmeye dayalı* kozmoloji modeline dönüşmüştür. Bu çerçevede, standart kozmoloji modeli, kısa bir zaman dilimi içinde -Büyük Patlama'dan 10^{-36} saniye ile 10^{-34} saniye sonrası arasında- değiştirilmiştir. Bu aralıkta evren, Standart Modelin öngördüğü 1'e 100 yerine, en az 1'e 10^{30}'luk devasa bir oranda genişlemiştir. Bu da kısacık bir zaman aralığında, Büyük Patlama'dan bir saniyenin trilyonda birinin trilyonda birinin trilyonda biri kadar bir süre sonra, evrenin boyutlarının 15 milyar yıldan beri olduğundan çok daha yüksek bir oranda büyüdüğü anlamına gelir. Bu genişleme öncesinde, bugün kozmosun birbirine çok uzak bölgelerinde bulunan maddeler birbirine standart kozmolojik modelde olduğundan çok daha yakındı; bu da aynı sıcaklığa kolayca ulaşılmasını mümkün kılıyordu. O sıralarda, Guth'un ortaya koyduğu ani kozmolojik şişmeyle birlikte -bunu standart kozmoloji modelindeki daha olağan genişleme izlemişti- uzay bölgelerinin bugün tanık olduğumuz geniş mesafelerle birbirlerinden ayrı olması mümkün olmuştu. Böylece, standart kozmoloji modelinde yapılan, şişirme kuramına dayalı küçük fakat derinlikli bir değişiklik, burada tartışmadığımız başka birçok önemli problemle birlikte ufuk problemini çözmüş, kozmologlar arasında geniş bir kabul görmüştür.



Şekil 14.1 Evrenin tarihinde birkaç kilit anı gösteren bir zaman çizelgesi

Planck zamanının hemen sonrasından şimdiye dek, mevcut kuram uyarınca evrenin tarihini Şekil 14.1'de görüldüğü şekliyle özetleyebiliriz.

Kozmoloji ve Süpersicim Kuramı

Şekil 14.1'de Büyük Patlamayla Planck zamanı arasında kalan, henüz tartışmamış olduğumuz bir kesit bulunuyor. Fizikçiler, gerekçesi ve getireceği sonuçlarla ilgili emin olmamakla birlikte, genel görelilik denklemlerini bu bölgeyle ilgili hesaplarda kullandıklarında, zaman içinde Büyük Patlamaya doğru geri gidildikçe evrenin daha da küçülmeye, ısınmaya ve yoğunlaşmaya devam ettiğini buldular. Sıfır zamanda, evrenin boyutları kaybolurken, genel göreliliğin klasik kütleçekimi çerçevesine sıkıca bağlı bu kuramsal evren modelinin tümden çöktüğüne dair en güçlü bir işaret olarak, sıcaklık ve yoğunluk sonsuza çıkar.

Doğa bize bu koşullar altında, genel görelilikle kuantum mekaniğini birleştirmemiz gerektiğini, başka bir deyişle sicim kuramını kullanmamız gerektiğini söylüyor üstüne basa basa. Halihazırda, sicim kuramının kozmolojiye etkileri üzerine araştırmalar henüz başlangıç aşamasındadır. Tedirginlik kuramına dayalı yöntemler en iyi ihtimalle, genel kavrayışlara götürür, çünkü enerji, sıcaklık ve yoğunluğun uç noktalarda olması hassas çözümlemeler

gerektirir, ikinci süpersicim devrimi, tedirginlik yaklaşımına dayanmayan bazı teknikler sağlamışsa da, bu tekniklerin kozmolojik bağlamlara gerekli türden hesaplar için güçlendirilmesi biraz zaman alacaktır. Yine de, burada ele aldığımız haliyle, son on yıl içinde fizikçiler sicim kozmolojisini anlama yönünde ilk adımları atmışlardır. Şimdi, buldukları şeyleri ele alalım.

Öyle görünüyor ki, sicim kuramı standart kozmolojik modeli üç temel biçimde değiştirmektedir. Öncelikle, mevcut araştırmaların açıklık kazandırmaya devam ettiği şekilde, sicim kuramı evrenin olabilecek en küçük boyuta sahip olduğuna işaret etmektedir. Standart kuram Büyük Patlama anında evrenin boyutlarının büzülerek sıfıra indiğini öne sürerken, sicim kuramının işaret ettiği şeyin Büyük Patlama anındaki evreni kavrayışımız açısından önemli sonuçları bulunmaktadır, İkincisi, evrenin olabilecek en küçük boyutlara sahip olduğu iddiasıyla yakından ilgili olarak, sicim kuramında bir küçük yarıçap/büyük yarıçap ikiliği vardır ve bu ikiliğin, göreceğimiz gibi kozmolojik bir önemi de bulunmaktadır. Son olarak, sicim kuramı dörtten fazla uzay-zaman boyutuna sahiptir ve bu yüzden, kozmolojik bir bakış açısıyla bunların hepsinin gelişimini ele almamız gerekir. Şimdi tüm bu noktaları daha ayrıntılı olarak ele alalım.

Başlangıçta Planck Boyutlarında Bir Topak Vardı

1980lerin sonlarında Robert Brandenberger ile Cumrun Vafa, sicim kuramının ortaya koyduğu bu özelliklerin uygulamada standart kozmolojik çerçevenin vardığı sonuçları nasıl değiştireceğini anlama yönünde ilk önemli adımları attı, iki önemli sonuca vardılar. Öncelikle, zaman içinde başlangıca doğru geri gittiğimizde sıcaklık, evrenin boyutları tüm yönlerde yaklaşık Planck uzunluğuna ininceye dek yükselmeyi sürdürür. Ama sonra, sıcaklık *maksimuma* ulaşır ve *azalmaya* başlar. Sezgisel olarak bunun ardındaki nedeni anlamak o kadar zor değildir. Basitlik ve sadelik adına, Brandenberger ve Vafa'nın yaptığı gibi, evrendeki tüm uzay boyutlarının dairesel olduğunu düşünelim. Zamanı geri sardığımızda, bu dairelerin her birinin yarıçapı küçülürken, evrenin sıckalığı artar. Fakatyarıçapların

her biri Planck uzunluğuna inerken, sicim kuramı çerçevesinde bunun, yarıçapların Planck uzunluğuna inmesi ve sonra sıçrayıp boyutlarının büyümesiyle fiziksel olarak aynı şey olduğunu biliyoruz. Evren genişlerken sıcaklık düştüğünden, evreni Planck-altı boyutlara sıkıştırmaya yönelik boşa çabanın sıcaklık artışının durması, maksimuma ulaşması ve sonra da azalmaya başlaması anlamına geldiğini düşünürüz. Brandenberger ve Vafa, ayrıntılı hesaplarla, durumun gerçekten böyle olduğunu kesin olarak doğruladılar.

Bu, Brandenberger ile Vafa'yı ele alacağımız kozmolojik tabloya götürdü. Başlangıçta, sicim kuramının tüm uzamsal boyutları olabilecek en küçük boyutlarda, ki bu da aşağı yukarı Planck uzunluğudur, sıkıca kıvrılmıştır. Sıcaklık ve enerji yüksektir fakat sonsuz değildir; çünkü sicim kuramı, sonsuzca sıkıştırılmış, sıfır boyutlu başlangıç noktası varsayımının çetrefillerinden kaçınmıştır. Evrenin bu başlangıç anında sicim kuramının tüm uzamsal boyutları eşit düzeydedir -hepsi tamamen simetriktir- hepsi çok boyutlu, Planck boyutlarında bir topak içinde kıvrılmıştır. Daha sonra, Brandenberger ve Vafa'ya göre, Planck zamanı sularında diğerleri başta sahip oldukları Planck ölçeğindeki boyutları korurken üç uzamsal boyut öne çıkıp genişlemeye başladığında, evren simetri azalmasının ilk aşamasına girer. Bu üç uzay boyutu, şişmeye dayalı kozmolojik senaryodaki üç boyutla birdir; sonra Şekil 14.1'de özetlediğimiz Planck zamanı sonrası gelişmeler başlar ve bu üç boyut genişleyerek bugün gözlemlediğimiz biçimlerine ulaşır.

Neden Üç Tane?

Akla gelebilecek ilk sorulardan biri, genişleme için tam olarak üç uzay boyutunu öne çıkaran simetri azalmasının altında neyin yattığıdır. Yani, deneysel bir olgu olarak sadece üç uzay boyutunun gözlemlenebilir büyüklüğe genişlemesinin ötesinde, sicim kuramı bize, niçin başka bir sayıda boyutun (dört, beş, altı ya da daha fazla) veya hatta daha simetrik şekilde, uzay boyutlarının tümden genişlememesine temel bir açıklama getirmekte midir? Brandenberger ile Vafa, geçerli olabilecek bir açıklama ileri sürdü. Unutulmamalıdır ki, sicim kuramının küçük yarıçap/büyük yarıçap

ikiliği, bir boyut bir daire gibi kıvrıldığında bir sicimin onun etrafını sarabileceği olgusuna dayanmaktadır. Brandenberger ile Vafa, tıpkı bir bisiklet tekerleğinin iç lastiğine sarılmış lastik bantlar gibi, böyle sarılmış sicimlerin sardıkları boyutları sıkıştırma eğiliminde olduğunu, onların genişlemelerini engellediğini fark etti. İlk bakışta bu, boyutların her birinin sıkıştırılacağı anlamına geliyor gibi görünecektir; çünkü sicimler hepsini sarabilirler ve sararlar. Burada belirsiz olan nokta, sarılmış bir sicim ve onun antisicim eşi (kabaca ifade etmek gerekirse, karşı yöndeki boyutu saran sicim) temas kuracak olursa, hızla birbirlerini yok edecekleri, *sarılmamış* bir sicim ortaya çıkaracaklarıdır. Bu süreçler yeterince hızlı ve etkili bir biçimde gerçekleşirse, lastik bantların yaptığına benzer sıkıştırma yeterince ortadan kaldırılacak, böylece boyutların genişlemesi mümkün olacaktır. Brandenberger ile Vafa, sarılmış sicimlerin takoz gibi sabitleyici etkisindeki bu azalmanın, uzamsal boyutların yalnızca üçünde gerçekleşeceğini ileri sürdü. Şimdi bunun nedenine bakalım.

Çizgiülke'nin uzamsal yayılımındaki gibi tek boyutlu bir çizgi üzerinde hareket eden iki tane nokta parçacık düşünelim. Doğrusal hızları aynı değilse, er geç biri öbürüne yetişecek ve çarpışacaklardır. Fakat dikkat edilmelidir ki bu nokta-parçacıklar, Düzülke'nin uzamsal yayılımına benzer ikiboyutlu bir düzlem üzerinde rasgele hareket ediyorsa, hiç çarpışmamaları olası olacaktır. İkinci uzamsal boyut her parçacığın önüne, çoğu aynı anda aynı noktada birbiriyle kesişmeyen, olası pek çok yol açar. Üç, dört ya da daha fazla sayıda boyutta, iki parçacığın hiç karşılaşmaması giderek daha olası hale gelir. Brandenberger ile Vafa, nokta-parçacıkların yerine, uzamsal boyutların etrafına sarılmış sicim ilmekleri geçirdiğimizde benzer bir fikrin geçerli olduğunu fark etti. Bunu görmek önemli ölçüde zor olsa da, *üç* (ya da daha az) dairesel uzamsal boyut varsa eğer, sarılmış iki sicim muhtemelen birbirleriyle çarpışacak, tek boyutta hareket eden iki parçacığın başına gelen şeyin benzeri olacaktır. Fakat dört ya da daha fazla sayıda uzay boyutu söz konusu olduğunda, sarılmış sicimlerin çarpışması daha az olası olacak, iki ya da daha fazla sayıda boyutta hareket eden nokta-parçacıkların başına gelenlerin bir benzeri gerçekleşecektir.

Böylece, şimdi göreceğimiz tablo ortaya çıkıyor. Evrenin ilk anında, yüksek fakat sonlu sıcaklıktan ileri gelen kargaşa, bütün boyutları genişleme çabasına iter. Boyutlar genişlemeye çabalarken, sarılmış sicimler sıkıştırma etkisiyle boyutları baştaki Planck-boyutlarındaki yarıçaplarına inmeye zorlayarak genişlemeyi kısıtlar. Fakat rasgele bir ısıl dalgalanma er geç, üç boyutu bir an için diğerlerinden daha fazla büyümeye itecektir ve bu durumda yaptığımız tartışma, bu boyutları sarmalayan sicimlerin çok büyük bir olasılıkla çarpışacağını göstermektedir. Çarpışmaların yaklaşık yarısını, sicim/antisicim çiftleri oluşturacaktır; bu da kısıtlamayı sürekli azaltan etkisizleştirmelere yol açacak, böylece üç boyutun genişlemeyi sürdürmesi mümkün olacaktır. Üç boyut ne kadar genişlerse, diğer sicimlerin onların etrafına sarılma ihtimalleri o kadar düşük olacaktır, çünkü bir sicimin daha büyük bir boyutu sarması daha fazla enerji gerektirir. Bu yüzden genişleme kendi kendini besler, boyutlar daha da büyürken giderek daha az sıkıştırılır. Bu üç boyutun önceki bölümlerde betimlendiği biçimde evrilmeyi sürdürdüğünü ve genişleyip bugün gözlenebilir olan evren kadar büyük ya da ondan daha büyük boyutlara eriştiğini düşünebiliriz artık.

Kozmoloji ve Calabi-Yau Şekilleri

Brandenberger ile Vafa, basitlik ve sadelik adına uzay boyutlarının tümünün dairesel olduğunu düşündü. VIII. Bölüm'de belirtildiği gibi, aslında dairesel boyutların ancak ve ancak bugünkü gözlemleme kapasitemizin dışında kalabilecek şekilde kendi üzerlerine kıvrılabilecek kadar büyük olması koşuluyla, dairesel bir şekil gözlemlediğimiz evrene uygundur. Fakat küçük kalan boyutlar açısından, bu boyutların daha girift bir Calabi-Yau uzayı şeklinde kıvrılması daha gerçekçi bir senaryodur. Kilit soru elbette, "Hangi Calabi-Yau uzayı?" sorusudur. Bu farklı uzay nasıl belirlenir? Bu soruyu kimse cevaplayama-mıştır. Fakat önceki bölümde anlattığımız, topoloji değiştiren sonuçları kozmolojiyle ilgili bu kavrayışlarla birleştirerek, söz konusu soruyu cevaplamamıza yardımcı olacak bir çerçeve önerebiliriz. Uzayda yırtılmaya yol açan konifold geçişler sayesinde, herhangi bir Calabi-Yau şeklinin başka

bir Calabi-Yau şekline dönüşebileceğini artık biliyoruz. Bu yüzden, Büyük Patlamayı izleyen kargaşa dolu sıcak anlarda, uzayın kıvrılmış Calabi-Yau bileşeninin küçük kalacağını, fakat çılgınca bir dansa başlayacağını ve bu sırada dokusunun yırtılıp tekrar tekrar birleşeceğini, bizi hızla uzun bir farklı Calabi-Yau şekiller silsilesinin içine sürükleyeceğini düşünebiliriz. Evren soğuyup uzay boyutlarının üçü genişlerken bir Calabi-Yau şeklinden diğerine geçiş yavaşlar ve buna paralel olarak fazladan boyutlar nihayet durulur ve iyimser olarak bakarsak, bugün etrafımızdaki dünyada gözlediğimiz fiziksel özelliklere yol açan bir Calabi-Yau şekline uyum sağlar. Fizikçilerin önündeki zorluk, uzayın Calabi-Yau bileşeninin gelişiminin ayrıntılı olarak anlaşdması, böylece bunun mevcut biçiminin kuramsal ilkelerden hareketle öngörülebilmesidir. Bir Calabi-Yau şeklinin yumuşak bir biçimde değişip bir başka Calabi-Yau şeklini alma biçimindeki yeni keşfedilen bu beceriden hareketle, birçok Calabi-Yau şekli arasından birini seçme meselesinin aslında bir kozmoloji sorununa indirgenebileceğini görüyoruz."

Başlangıçtan Öncesi?

Brandenberger ile Vafa, sicim kuramının kesin denklemlerinden yoksun oldukları için, kozmolojik incelemelerinde çoğu kez yaklaşık hesaplara ve varsayımlara dayanmak zorunda kaldılar. Vafa'nın kısa zaman önce söylediği gibi, Çalışmamız, sicim kuramının kozmolojiyle ilgili standart yaklaşımın bitmek bilmeyen sorunlarını ele almaya başlamamızı nasıl yeni bir biçimde mümkün kıldığına ışık tutmaktadır. Örneğin, sicim kuramının bütün o tuhaf başlangıç düşüncesinden tümüyle kaçınabildiğim görüyoruz. Fakat sicim kuramına dair bugünkü anlayışımızla böyle uç koşullara ilişkin tam güvenilir hesaplar yapabilmenin zorlukları yüzünden, çalışmamız yalnızca sicim kozmolojisine bir ilk bakış sunmaktadır ve son söz olmaktan çok çok uzaktır."

Brandenberger ile Vafa'nın çalışmalarından bu yana fizikçiler, sicim kozmolojisini daha iyi kavrama konusunda hızlı bir ilerleme kaydettiler; bunların başında başka fizikçilerin yanı sıra Torino Üniversitesinden Gabriele Veneziano ile çalışma arkadaşı Maurizio

Gasperini gelir. Gasperini ile Veneziano, aslında, yukarıda anlatılan senaryoyla bazı ortak noktaları olan, ama önemli yönleriyle ondan ayrılan, ilginç bir sicim kozmolojisi türü geliştirdi. Brandenberger ile Vafa'nın çalışmasında olduğu gibi, onlar da, standart kozmoloji ve şişmeye dayalı kozmoloji kuramlarında ortaya çıkan sonsuz sıcaklık ve enerji yoğunluğu sonucundan kaçınmak amacıyla sicim kuramının minimum bir uzunluğa sahip olmasına dayanır. Fakat Gasperini ile Veneziano, bu durumun başlangıçta evrenin son derece sıcak, Planck boyutlarında bir topak olarak doğması anlamına geldiği sonucuna varmak yerine, evrenin Planck boyutlarındaki kozmik embriyoya yol açan -buraya kadar sıfır zaman dediğimiz şeyden çok önce başlamış- bir *öntarihi* olabileceğini ileri sürer.

Büyük Patlama öncesi senaryo denilen bu senaryoya göre evren başta, Büyük Patlama çerçevesinde çizilen tablonun gösterdiğinden son derece farklı bir haldeydi. Gasperini ile Veneziano'nun çalışması, evrenin, muazzam derecede sıcak, küçük uzamsal bir benek halinde sıkı sıkıya kıvrılmış olmaktan çok, başlangıçta soğuk ve esasen uzamsal boyutlarda *sonsuz* olarak ortaya çıktığını ileri sürer. O halde sicim kuramı denklemleri -biraz Guth'un ileri sürdüğü şişmeye dayalı devrede olduğu gibi- bir istikrarsızlığın devreye girdiğini, evrendeki her noktayı hızla birbirinden uzaklaştırdığını göstermektedir. Gasperini ile Veneziano, bu durumun uzayın giderek daha fazla kıvrılmasına ve sonuçta sıcaklık ve enerji yoğunluğunda ciddi bir artışa yol açtığını belirtmektedir. Bir süre sonra, bu engin genişliğin *içindekibir* milimetre büyüklüğünde üçboyutlu bölge, Guth'un çizdiği şişmeye dayalı genişleme tablosunda ortaya çıkan son derece sıcak ve yoğun yamaya benziyor gibiydi. O halde, bildiğimiz Büyük Patlama kozmolojisindeki standart genişleme sayesinde, bu yama, aşina olduğumuz o koca evreni açıklayabilir. Dahası, Büyük Patlama öncesi evre tablosu da şişmeye dayalı bir genişleme içerdiğinden, Guth'un ufuk problemine getirdiği çözüm, otomatik olarak Büyük Patlama öncesi kozmolojik senaryoya içkindir. Veneziano'nun dediği gibi, "Sicim kuramı, şişmeye dayalı kozmolojinin bir versiyonunu bize gümüş bir tabakta sunar.

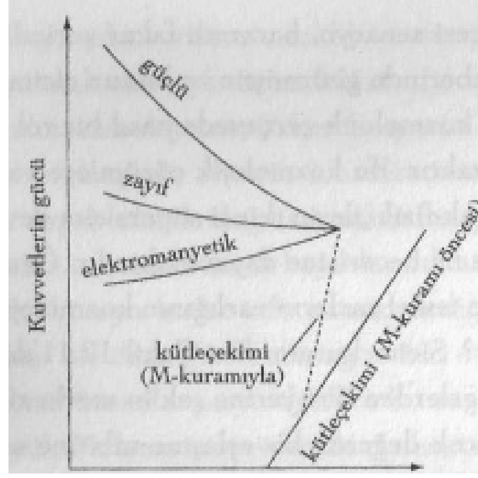
Süpersicim kozmolojisiyle ilgili incelemeler, hızla faal ve verimli bir araştırma alanı haline gelmektedir. Örneğin Büyük Patlama öncesi senaryo, hararetli fakat verimli çok sayıda tartışmayı beraberinde getirmiştir ve bunun sicim kuramından çıkacak nihai kozmolojik çerçevede nasıl bir rol oynayacağı açık olmaktan uzaktır. Bu kozmolojik çözümlere varmak, kuşkusuz ağırlıklı olarak fizikçilerin ikinci süpersicim devrimini tüm yönleriyle kavrama becerisine dayanmaktadır. Örneğin, daha fazla boyuta sahip temel zarların varlığının kozmolojik açıdan sonuçları nelerdir? Sicim kuramı bizi Şekil 12. l1'de yarımada biçimindeki bölgelerden biri yerine şeklin merkezine yakın bir yere yerleştirecek değerde bir eşleşme sabitine sahipse, tartışmış olduğumuz kozmolojik özellikler nasıl bir değişim gösterir? Yani, eksiksiz haliyle M-kuramının evrenin ilk anları üzerinde nasıl bir etkisi vardır? Bugün bu temel sorular üzerinde önemle durulmaktadır. Bu çabaların getirdiği değerli bir kavrayış şimdiden ortaya çıkmış bulunuyor.

M-Kuramı ve Bütün Kuvvetlerin Birleşmesi

Şekil 7.1'de, evrenin sıcaklığı yeterince yüksek olduğunda, kütleçekimi dışındaki üç eşleşmenin güçlerinin nasıl birleşeceğini gösterdik. Peki, kütleçekimi kuvvetinin gücü, bu tabloda nereye oturmaktadır? M-kuramının ortaya çıkması öncesinde sicim kuramcıları, uzayın Calabi-Yau bileşeni için en basit tercihleri yaptığımızda, kütleçekimi kuvvetinin, Şekil 14.2'de gösterildiği üzere diğer üç kuvvetle tam olmasa da neredeyse birleştiğini göstermeyi başardılar. Sicim kuramcıları, denedikeri diğer pek çok incelikli yöntemin yanı sıra, seçilmiş Calabi-Yau şeklini titiz bir biçimde kalıplayarak bu uyumsuzluktan kaçınmanın mümkün olabileceğini gördüler, fakat bulgulara uyarlanarak yapılan bu tarz ince ayarlar fizikçileri hep huzursuz eder. Calabi-Yau boyutların kesin biçiminin nasıl tahmin edileceğini şu an kimse bilmediğinden, boyutların şekilleriyle ilgili ince ayrıntılara bu kadar hassas biçimde dayanan çözümlere yaslanmak tehlikeli görünmektedir.

Fakat Witten, ikinci süpersicim devriminin çok daha güçlü bir çözüm sunduğunu göstermiştir. Witten, sicim eşleşme sabitinin

küçük olmasının zorunlu olmadığı zaman kuvvetlerin güçlerinin nasıl değişeceğini inceleyerek, kütleçekimi kuvveti eğrisinin, uzayın Calabi-Yau bileşenini özel bir kalıba dökmeye gerek kalmaksızın. Şekil 14.2'de olduğu üzere yumuşak bir biçimde başka kuvvetlerle birleşmeye hafifçe itilebileceğini buldu. Bu, bir şey söylemek için henüz çok erken olsa da, M-kuramı-nın daha geniş çaplı çerçevesinden yararlanarak kozmolojik birliğe daha kolay ulaşılabileceğini gösteriyor olabilir.



Şekil 14.2 M-kuramı çerçevesinde, dört kuvvetin güçleri doğal olarak birleşebilir.

Bu ve önceki bölümlerde tartışılan gelişmeler, sicim/M-kuramının kozmolojik anlamlarını kavrama yönündeki ilk ve biraz da kesin olmayan adımları temsil ediyor. Fizikçiler, gelecek yıllarda sicim/M-kuramına özgü, tedirginlik yaklaşımına dayanmayan araçlar güçlendirildikçe, bunların kozmolojinin konularına uygulanmasıyla gayet sağlam birtakım kavrayışlara ulaşılacağını beklemektedir.

Fakat sicim kuramına göre kozmolojiyi anlamaya yetecek kadar güçlü yöntemler şu an elimizde bulunmasa da, nihai kuram arayışı içinde kozmolojinin olası rolüyle ilgili bazı genel değerlendirmeler üzerinde düşünmeye değer. Bu fikirlerin bazılarının, daha önce ele aldıklarımıza kıyasla daha spekülatif nitelik taşıdığı uyarısında bulunalım, ancak bunlar, nihai olması amaçlanan bir kuramın bir gün ele almak zorunda kalacağı meseleleri gündeme getirmektedir.

Kozmolojik Spekülasyonlar ve Nihai Kuram

Kozmoloji bizi çok derinden etkileme potansiyeline sahiptir, çünkü her şeyin nasıl başladığına dair bir anlayışa vardığımızda -en azından kimimiz- *neden* başladığını da anlamaya en yakın noktada hissederiz kendimizi. Bu, modern bilimin nasıl sorusuyla neden sorusu arasında bir bağlantı sunduğu anlamına gelmiyor -böyle bir bağlantı ortaya koymaz- ve böyle bir bilimsel bağlantının hiç bulunmaması da söz konusu olabilir pekâlâ. Fakat kozmoloji çalışmaları, neden sorusunun alanına -evrenin doğuşuna- dair daha eksiksiz bir kavrayış sunmayı vaat eder, bu da en azından soruların sorulduğu çerçeveye bilimselliğe dayalı bir bakışla yaklaşmayı mümkün kılar. Kimi zaman, bir soruya çok güçlü olan aşinalığımız sorunun cevabını gerçekten bilmenin yerine koyabileceğimiz en iyi şeydir.

Nihai kuram arayışı bağlamında, kozmolojiyle ilgili bu yüksek fikirler, çok daha somut değerlendirmelere kapı açar. Evrendeki şeylerin bugün bize görünme biçimi -Şekil 14.1'deki zaman çizgisinin iyice sağ tarafı- kuşkusuz fiziğin temel yasalarına dayanır; fakat en derin kuramın bile kapsamının dışında kalması mümkün olan, kozmolojik evrimin zaman çizgisinin iyice sol tarafında kalan yönlerine de dayanıyor olabilir.

Bunun nasıl olabileceğim düşünmek çok da zor değildir. Örneğin, havaya bir top attığınızda neler olduğunu düşünün. Topun bundan sonra nasıl hareket edeceğini kütleçekimi yasaları belirler, fakat topun nereye düşeceğini yalnızca bu yasalardan hareketle kestiremeyiz. Topun elimizden çıktığı sıradaki doğrusal hızım da bilmemiz gerekir. Yani, topun hareketinin *başlangıçtaki koşullarını* bilmemiz gerekir. Benzer şekilde, evrenin tarihsel rastlantıyla ortaya çıkmış olabilecekyönleri de vardır. Biryddızın neden şurada bir gezegenin neden orada ortaya çıktığı, en azından ilkesel olarak, her *şeyin* başlangıcında evrenin durumuyla ilgili bir özellikte izlerini bulabileceğimizi düşündüğümüz karmaşık bir olaylar dizisine dayanır. Fakat evrenin çok daha temel özelliklerinin, hatta temel madde ve kuvvet parçacıklarının özelliklerinin bile tarihsel gelişime,

yani beklenmedik olaylarla evrenin ilk koşullarına dayanan gelişime doğrudan bağlı olması mümkündür.

Aslına bakılırsa, bu fikrin sicim kuramı çerçevesinde olası bir somutlanışına çoktan değinmiş bulunuyoruz: İlk zamanlardaki o sıcak evren gelişirken, diğer boyutlar şekilden şekle girmiş, sonunda şeyler yeterince soğuduğunda belirli tek bir Calabi-Yau uzayında durulmuş olabilir. Fakat tıpkı havaya atılan bir top gibi, birinden diğerine çok sayıda Calabi-Yau şekli arasında geçen bu yolculuğun sonucu da yolculuğun nasıl başladığına, başlangıçtaki ayrıntılara bağlı olabilir. Sonuçta ortaya çıkan Calabi-Yau şeklinin parçacık kütlelerine ve kuvvetlerin özelliklerine etkisine bakarak, kozmolojik evrimin ve evrenin baştaki durumunun bugün gözlemlemekte olduğumuz fizik üzerinde derin bir etkisi olabileceğini görüyoruz.

Evrenin ilk koşullarının nasıl olduğunu bilmiyoruz, hatta bu koşullan tanımlamada kullanılması gereken fikirleri, kavramları ve dili de bilmiyoruz. Standart kozmoloji modelinde ve şişmeye dayalı kozmoloji modeli çerçevesinde, o en başta ortaya çıkan acayip durumun, yani enerji, yoğunluk ve sıcaklığın *sonsuz* olması halinin, aslında gerçekleşmiş koşullarla ilgili doğru bir tanımlama olmaktan çok, bu kuramların çöktüğüne dair bir işaret olduğuna inanıyoruz. Sicim kuramı, sonsuzu gösteren bu uç durumlardan nasıl kaçınılabileceğini göstererek bir ilerleme yolu sunmaktadır; bununla birlikte, her şeyin aslında nasıl başladığı sorusuyla ilgili olarak kimsenin bir kavrayışı yoktur. Aslında, bilgisizliğimiz çok daha yüksek bir düzeyde sürmektedir: İlk koşulların nasıl olduğunu belirlemekle ilgili soru, sorulması anlamlı bir soru mudur -genel göreliliğe başvurup topu havaya ne kadar sert fırlattığınızla ilgili olarak size bir kavrayış kazandırmasını beklemek gibi bir şeydir bu- yoksa herhangi bir kuramın asla cevap veremeyeceği bir soru mudur, bunu da bilmiyoruz. Hawking ve California Üniversitesi'nden James Hartle gibi fizikçilerin cesur girişimleriyle, ilk koşulların nasıl olduğuna dair kozmolojik soru fizik kuramının şemsiyesi altına alınmaya çalışılmıştır, fakat bu girişimlerin hepsi de sonuçsuz kalmıştır. Sicim/M-kuramı bağlamında, bugün kozmoloji anlayışımız, "her şeyin kuramı" olmaya aday gösterdiğimiz kuramın gerçekten de bu adı hak

edip etmediğini, kendi kozmolojik ilk koşullarını belirleyip onları fizik yasası mertebesine taşıyıp taşıyamayacağını tespit edemeyecek kadar ilkeldir. Bu soru, gelecekteki araştırmaların ana sorusu olacaktır.

Fakat ilk koşullar ve bunların kozmik evrimde tarihsel sapaklar ve virajlar ortaya çıkması üzerindeki etkisi meselesinin de ötesinde, son dönemlerdeki son derece spekülatif bazı iddialar bir nihai kuramın açıklayıcı gücünün başka olası sınırları olduğunu savunmaktadır. Bu fikirler doğru mudur, yanlış mıdır kimse bilmiyor, fakat bugün bunların ana akım bilimin dolaylarında bulunduğu kesindir. Gelgelelim, biraz kışkırtıcı ve spekülatif bir tarzda da olsa, nihai kuram olarak ileri sürülen bir kuramın karşılaşabileceği bir engele ışık tutarlar.

Temel fikir şu olasılığa dayanmaktadır: *Evren* dediğimiz şeyin aslında, engin bir kozmolojik genişliğin yalnızca küçük bir parçası olduğunu, devasa genişlikte kozmolojik bir takımada oluşturan, oraya buraya dağılmış muazzam sayıda ada evrenden yalnızca biri olduğunu düşünelim. Kulağa biraz zorlama gelse de -sonuçta pekâlâ öyle de olabilir- Andre Linde, böyle devasa bir evrene yol açabilecek somut bir mekanizma ortaya koymuştur. Linde'nin bulduğu şey, daha önce tartışmış olduğumuz şişmeye dayalı genişlemeyi beraberinde getiren o kısa fakat kritik patlamanın, benzersiz, bir seferlik bir olay olmayabileceğiydi. Linde, şişmeye dayalı genişlemeye yol açan koşulların, kozmosa dağılmış yalıtılmış bölgelerde tekrar tekrar ortaya çıkabileceğini, sonra bu bölgelerin de şişip genişleyeceğini ve yeni, başka evrenlere dönüşebileceğini savundu. Bu evrenlerin her birinde bu süreç devam eder, eski evrenin uzak bölgelerinde yeni evrenler doğar ve böylece hiç sonu gelmeyen bir şişmeye dayalı kozmik genişleme ağı ortaya çıkar. Terminoloji biraz sıkıcı bir hal almaktadır, ama geleneğe uyalım ve bu muazzam şekilde genişleyen evren kavramına *çoklu evren* (multiverse), onu oluşturan bileşenlerin her birine de bir evren diyelim.

Bu durumda temel gözlem şudur: VII. Bölüm'de, bildiğimiz her şeyin evrende tutarlı ve tektip bir fizik bulunduğuna işaret ettiğini görsek de, bu durumun bizden ayrı olmaları ya da en azından ışıkları

bize ulaşacak zaman bulamayacak kadar uzak olmaları koşuluyla öbür evrenlerdeki fiziksel özellikler açısından geçerli olmaması mümkündür. Bundan dolayı, fiziğin bir evrenden diğerine değiştiğini hayal edebiliriz. Bazı evrenlerde farklılıklar kolayca fark edilemeyebilir: Örneğin elektronun kütlesi ya da güçlü kuvvetin gücü, bizim evrenimizde olduğunun binde biri kadar daha büyük ya da daha küçük olabilir. Diğer evrenlerde fizik, daha belirgin biçimlerde farklılık gösterebilir. I. Bölüm'de gösterildiği gibi, yıldızlar ve bildiğimiz haliyle yaşam üzerindeki tüm güçlü etkileriyle, yukarı kuark bizim evrenimizde olduğundan on kat daha ağır olabilir ya da elektromanyetik kuvvetin gücü, bizim ölçtüğümüz değerin on katına eşit olabilir. Başka bazı evrenlerde fizik daha ciddi başka farklılıklar gösterebilir. Temel parçacıklar ve kuvvetler listesi bizim listemizden tümüyle farklı olabilir ve sicim kuramının verdiği ipucunu alırsak, uzamış boyutların sayısı bile farklı olabilir. Örneğin sıkışmış bazı evrenlerde bir tek geniş uzamsal boyut olabileceği gibi, hiç olmayabilir de; diğer taraftan, genişleyen başka evrenlerde ise sekiz, dokuz, hatta on tane uzamış uzamsal boyut olabilir. Hayalgücümüzü serbest bırakırsak, yasalar bile bir evrenden diğerine ciddi bir farklılık gösterebilir. Olasılıkların sonu yoktur.

Mesele şudur ki, bu devasa, karmakarışık evrenler labirentini taradığımızda, evrenlerin büyük çoğunluğunun yaşama, en azından bildiğimiz biçimiyle, uzaktan yaşama benzeyen bir şeye elverişli koşullara sahip olmadığını görürüz. Bildiğimiz fizikte ortaya çıkabilecek önemli değişiklikleri düşündüğümüzde, şu nokta açıktır: Evrenimiz gerçekten de Bahçe Hortumu evrene benzeseydi, bildiğimiz biçimiyle yaşam var olmazdı. Fizikte yaşanacak basit değişiklikler bile, örneğin yıldızların oluşum sürecini olumsuz etkiler, onların, normalde süpernova patlamalarıyla evrenin dört bir yanına dağılan karbon ve oksijen gibi yaşamı destekleyici karmaşık atomları sentezleyen kozmik ocaklarmışçasına hareket etmeyetisini sekteye uğratırdı. Yaşamın hassas bir biçimde fiziğin ayrıntılarına bağlı olmasını göz önünde bulundurarak, doğadaki kuvvetler ve parçacıkların neden gözlemlediğimiz belli özelliklere sahip olduğu sorusunu soracak olursak, şöyle olası bir cevap kendini gösterir: Çoklu evrenin tamamında, bu özellikler büyük farklılıklar gösterir;

kuvvetlerin ve parçacıkların özellikleri, başka evrenlerde farklı *olabilir ve farklıdır.* Parçacık ve kuvvet özelliklerinin gözlediğimiz bileşime sahip olmasında özel olan nokta, açıktır ki bu özelliklerin yaşamın oluşumunu mümkün kılmasıdır. Yaşam, özellikle de zeki yaşam, evrenimizin niçin kendisinde bulunan özelliklere sahip olduğu sorusunun sorulmasının bile ön koşuludur. Daha açık bir deyişle, evrenimizde her şey olduğu gibidir, çünkü eğer böyle olmasaydı, biz burada olup böyle olduğunu fark edemezdik. Toplu halde oynanan bir Rus ruleti oyunundan galip çıkanların, yenilmemiş olmaları karşısında hissettiği şaşkınlığın, kazanmamış olsalardı *şaşkınlık* hissedemeyeceklerini fark etmeleriyle hafiflemesinde olduğu gibi, çoklu evren varsayımı da evrenimizin neden göründüğü gibi göründüğünü açıklama konusundaki ısrarımızı azaltmaktadır.

Bu çizgideki tartışma, uzun bir tarihi olan ve *insancı ilke* olarak bilinen düşüncenin bir çeşitidir. Sunulduğu biçimiyle bu düşünce, evren başka türlü olamayacağı için şeylerin oldukları gibi olduğunu söyleyen, katı, tümden tahmin etme gücüne sahip, birleşik bir kuram hayaline taban tabana zıt bir bakış açısıdır. *Çoklu evren ve* insancı ilke, her şeyin değiştirilemez bir zarafetle yerli yerine oturduğu, şürsel bir inceliğin örneği olmak yerine, doyurulamaz bir çeşitlilik iştahıyla, son derece ölçüsüz bir evrenler topluluğu resmi çizer. *Çoklu evren* resminin geçerli olup olmadığını öğrenmek bizim için imkânsız değilse de çok zor olacaktır. Başka evrenler varsa bile, asla hiçbiriyle temas kurmayacağımızı düşünebiliriz. Fakat *çoklu evren* kavramı, "orada olan şey"in ölçeğini inanılmaz derecede artırarak - Hubble'ın, Samanyolu'nun birçok galaksiden yalnızca biri olduğunu fark etmesini solda sıfır bırakan bir biçimde- en azından bizi, nihai bir kuramdan çok fazla şey bekliyor olabileceğimiz ihtimaline karşı uyarmaktadır.

Nihai kuramımıza, bütün kuvvetler ve bütün maddeye dair, kuantum mekaniğine özgü tutarlı bir betimleme yapması koşulunu getirmemiz gerekiyor. Nihai kuramımıza, evrenimiz çerçevesinde inandırıcı bir kozmoloji sunması koşulunu getirmemiz gerekiyor. Gelgelelim, *çoklu evren* resmi doğruysa eğer -koca bir eğer- kuramımızın parçacık kütleleri, yükleri ve kuvvetlerin güçlerine özgü

ayrıntılı özellikleri açıklamasını istemek ondan çok şey istemek de *olabilir.*

Fakat şunu da vurgulamamız gerekir ki, spekülatif *çoklu evren* öncülünü kabul etsek bile, bunun tahmin etme gücümüzü tehlikeye attığı sonucu hiç de sorgulanamaz değildir. Bunun nedeni, basitçe ifade etmek gerekirse, hayal gücümüzü serbest bırakıp bir *çoklu evren* düşünmemize izin verecek olursak, kuramsal düşüncelerimizi de serbest bırakıp *çoklu evrenin* görünürdeki rasgeleliğini ehlileştirmenin yolları üzerine düşünmemizin gerekmesidir. Görece muhafazakar bir düşünme biçimiyle, *çoklu evren* resmi doğru olsaydı eğer, nihai kuramımızı *çoklu evrenin* yayılıp giden enginliğini de kapsayacak şekilde genişletebileceğimiz!, "genişlemiş nihai kuramımız"ın temel parametre değerlerinin *çoklu evreni* oluşturan evrenlere tam olarak neden ve nasıl serpiştirildiğini söyleyebileceğini hayal edebiliriz.

Penn Eyalet Üniversitesi'nden Lee Smolin'in önerisi daha radikal bir düşünme biçimi ortaya koymaktadır. Büyük Patlama koşulları ile kara deliklerin merkezlerindeki koşulların benzerliğinden -sıkışmış maddenin muazzam yoğunluğu- ilham alan Smolin bütün kara deliklerin yeni bir evrenin tohumu olduğunu, bu yeni evrenlerin Büyük Patlamaya benzer bir patlamayla vücut bulduğunu, fakat kara deliğin olay ufkuyla ebediyen gözlerimizden gizlendiğini ileri sürmüştür. Smolin, bir *çoklu evrenin* ortaya çıkmasına ilişkin başka bir mekanizma ileri sürmenin ötesinde, insancı ilkeyle ilişkili bilimsel sınırlamaların etrafında bir bitirme koşusu yapan yeni bir unsur -genetik mutasyonun kozmik versiyonu- devreye sokmuştur. Düşünün, der Smolin, bir kara deliğin çekirdeğinden bir evren doğduğunda, fiziksel özellikleri, örneğin parçacık kütleleri ve kuvvetlerin güçleri ana evrendekilere yakındır, ama onlarla aynı değildir. Kara delikler sönmüş yıldızlardan doğduğundan ve yıldız oluşumu da parçacık kütleleri ve kuvvet güçlerinin kesin değerlerine dayandığından, belli bir evrenin doğurganlığı -üretebileceği yeni kara delik neslinin sayısı- hassas bir biçimde bu parametrelere dayanır. Dolayısıyla yeni nesil evrenlerde parametrelerdeki küçük değişiklikler, bazılarının kara delik üretiminin ana evrenlerinden daha

elverişli olmasına, çok daha fazla sayıda yavru evren doğurmalarına yol açar. Birçok "kuşak" sonra, kara delik üretmeye elverişli evrenlerin torunları o kadar fazla sayıda olacaktır ki, *çoklu evren* nüfusunda ezici çoğunluğu oluşturacaklardır. Böylece, Smolin'in önerisi insancı ilkeye başvurmak yerine, ortalamada her yeni kuşak evrenin parametrelerini belli değerlere -kara delik üretimi için en elverişli değerlere- daha da yaklaştıran dinamik bir mekanizma ortaya koyar.

Bu yaklaşım, çoklu evren bağlamında dahi, temel madde ve kuvvet parametrelerini açıklayabilecek başka bir yöntem ortaya koyar. Smolin'in kuramı doğruysa, bizler de olgun bir çoklu evrenin tipik bir üyesi isek eğer (bunlar büyük "eğerler"dir ve tabi ki birçok açıdan tartışılabilirler), parçacıklar ve kuvvetlerin ölçtüğümüz parametrelerinin kara delik üretimi için elverişli hale getirilmesi gerekir. Başka bir deyişle, evrenimizin bu parametrelerinde bir oynama, kara delik oluşumunu zorlaştırır. Fizikçiler bu öngörüyü araştırmaya başlamışlardır ve halihazırda bunun geçerliliği üzerinde bir fikir birliği yoktur. Fakat Smolin'in iddiasının yanlış olduğu anlaşdsa dahi, bu öneri nihai kuramın alabileceği başka bir şekli sunmaktadır. Nihai kuram ilk bakışta, katılıktan yoksunmuş gibi görünebilir. Kuramın, çoğu bizim yaşadığımız evrenle alakasız bir evrenler bolluğunu betimleyebileceğin! anlayabiliriz. Dahası, bu evrenler bolluğunun fiziksel olarak gerçekleşip bir *çoklu evren* -ilk bakışta, tahmin etme gücümüzü ebediyen sınırlayan bir şey- ortaya çıkarabileceğini düşünebiliriz. Aslına bakarsanız bu tartışma, yalnızca nihai kanunları değil, bunların kozmolojik evrimde işaret ettiği şeyleri de beklenmedik derecede büyük bir ölçekte kavramamız koşuluyla nihai bir açıklamaya ulaşabileceğimizi gösteriyor.

Sicim/M-kuramının kozmolojik anlamları, hiç kuşkusuz 21. yüzyılda da başlıca araştırma alanlarından biri olacaktır. Planck ölçeğinde enerjiler üretme yeteneğine sahip hızlandırıcılarımız olmadığından, deneysel verilerimiz için Büyük Patlamaya, bu kozmolojik hızlandırıcıya ve onun evrende bizim için geride bıraktığı kalıntılara giderek daha fazla dayanacağız. Şans ve sabırla, sonunda evrenin nasıl başladığı, göklerde ve yerde gördüğümüz

biçimi nasıl aldığı sorularını cevaplayabilecek duruma gelebiliriz. Elbette, bulunduğumuz yerle bu temel soruların cevaplarının yattığı yer arasında henüz bilinmeyen geniş topraklar vardır. Fakat süper sicim kuramı sayesinde bir kuantum kütleçekimi kuramının geliştirilmesi, artık bilinmeyenin enginliklerine açılmamızı sağlayacak kuramsal araçlara sahip olduğumuz ve kuşkusuz birçok mücadeleden sonra, bugüne dek sorulmuş en derin soruların bazılarına muhtemelen cevaplar verebileceğimiz umuduna inancımızı güçlendirmektedir.

XV. Bölüm

Sicim Kuramının Geleceği

Belki yüzyıllar sonra, süpersicim kuramı ya da kuramın M-kuramı içindeki evrimi, bugünkü formülasyonumuzun çok çok ötesine, bugünün önde gelen araştırmacılarının bile tanıyamayacağı bir yere gidebilir. Nihai kuram arayışımızı sürdürürken, sicim kuramının, kozmosa dair çok daha geniş kapsamlı bir kavrayışa -daha önce karşılaştığımız her şeyden radikal bir biçimde farklılaşan fikirleri içeren bir kavrayışa- giden yolda atılmış öncü niteliğinde birçok adımdan yalnızca biri olduğunu görebiliriz. Bilim tarihi, her şeyi kavradığımızı düşündüğümüz her seferinde, doğanın karşımıza, dünyayı düşünme biçimimizde ciddi, kimi zaman da büyük değişimler gerektiren esaslı sürprizler çıkardığını anlatır. O halde, bizden öncekilerin naifçe yapmış olduğu gibi biraz atılgan bir zihniyetle, insanlık tarihinde evrenin nihai kanunlarıyla ilgili arayışın nihayetinde son bulmaya yaklaştığı, dönüm noktası niteliğinde bir dönemde yaşadığımızı düşünebiliriz. Edward Witten'ın da söylemiş olduğu gibi,

Sicim kuramıyla o kadar yaklaşmış olduğumuzu hissediyorum ki -en iyimser anlarımda- bir gün, kuramın nihai biçiminin göklerden düşüp birinin kucağına inivereceğini hayal ediyorum. Ama daha gerçekçi yaklaşacak olursak, bugün daha önce sahip olduklarımızdan çok daha derin bir kuram inşa etme sürecinde olduğumuzu, 21. yüzyılda, konuyla ilgili yararlı düşüncelerim olamayacak kadar yaşlandığımda, nihai kuramı aslında bulup bulmadığımız konusunda genç fizikçilerin karar vermek zorunda kalacağını hissediyorum.

Halen ikinci süpersicim devriminin artçı şoklarını hissediyor, ortaya koyduğu yeni kavrayış donanımını hazmediyor olsak da, sicim kuramcılarının çoğu, sicim kuramının gücünün tam anlamıyla ortaya çıkması ve nihai kuram olarak olası rolünün değerlendirilmesi için muhtemelen üçüncü, belki de dördüncü bir kuramsal alt üst oluş yaşanması gerektiğine katılıyor. Daha önce de görmüş olduğumuz

gibi, sicim kuramı, evrenin nasıl işlediğine dair dikkat çekici yeni bir tablo ortaya koymuştur, fakat 21. yüzyılda sicim kuramcılarının üzerinde çalışacağı kurama dair ciddi engeller ve boşluklar da mevcuttur. Bu yüzden de bu son bölümde, insanlığın, evrenin en derin yasalarını arayış hikâyesini anlatmayı bitiremeyeceğiz, çünkü bu arayış sürüyor. Onun yerine bakışlarımızı sicim kuramının geleceğine yöneltelim, sicim kuramcılarının nihai kuram arayışını sürdürürken karşılaşacağı beş temel sorunu tartışalım.

Sicim Kuramının Altında Yatan Temel İlke Nedir?

Geçen yüzyıl içinde öğrendiğimiz, derslerden biri, bilinen fizik yasalarının simetri ilkeleriyle ilişkili olduğudur. Özel görelilik, görelilik ilkesinde vücut bulmuş simetriye -sabit hız ve yöndeki bütün sabit noktalar arasındaki simetriye- dayanır, kütleçekimi kuvveti, genel görelilik kuramıyla somutlaştırıldığı şekliyle eşdeğerlik ilkesine dayanır; yani, görelilik ilkesinin, hareket hallerinin karmaşıklığından bağımsız olarak olası bütün sabit noktaları içine alacak şekilde genişletilmesine dayanır. Güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetler de daha soyut ayar simetrisi ilkelerine dayanırlar.

Daha önce de tartışmış olduğumuz gibi fizikçiler, simetri ilkelerini üstün bir yere koyma eğilimindedirler, bu ilkelere açıklamanın temelinde dürüstçe yer verirler. Bu bakış açısına göre, kütle çekim, olası bütün gözlem noktalarının tümüyle eşit düzeyde olması, yani eşdeğerlik ilkesinin geçerli olması için *vardır.* Keza kütleçekimi dışındaki güçler de doğanın onlarla ilişkili ayar simetrilerine saygı göstermesi için *vardır.* Elbette ki bu yaklaşım, bir kuvvetin neden var olduğu sorusunu doğanın onunla ilişkili simetri ilkesine neden saygılı olduğu sorusuna kaydırıyor. Fakat bu kuşkusuz ilerleme gibi geliyor, özellikle de söz konusu simetri gayet doğal görünen bir simetriyse. Örneğin, bir gözlemcinin referans çerçevesine neden bir başkasının referans çerçevesinden daha farklı muamele edilmesi gereksin ki? Evrenin yasalarının bütün gözlem noktalarına eşit biçimde muamele etmesi çok daha doğal görünüyor; bu da eşdeğerlik ilkesiyle ve kütleçekimin kozmosun yapısına dahil edilmesiyle sağlanıyor. Bunu tam anlamıyla değerlendirmek biraz matematiksel birikim gerektirse

de, V. Bölüm'de belirttiğimiz üzere, kütleçekimi dışındaki üç kuvvetin temelindeki ayar simetrilerinin arkasında da benzer bir mantık vardır.

Sicim kuramı açıklamalarında, bütün bu simetri ilkelerinin yanı sıra, başka bir simetri ilkesi daha -süpersimetri- sicim kuramının yapısından doğar. Aslına bakarsanız, tarih farklı bir yol izlemiş olsaydı ve fizikçiler sicim kuramıyla bir yüzyıl kadar önce tanışmış olsaydı, bu simetri ilkelerinin hepsi de sicim kuramının özelliklerinin incelenmesiyle ortaya çıkarılmış olabilirdi diye düşünebiliriz. Fakat şunu unutmayalım ki, eşdeğerlik ilkesi kütleçekimin neden var olduğuna dair belli bir kavrayış kazandırıyor. Ayar simetrileri de kütleçekimi dışındaki kuvvetlerin neden var olduğuna dair bize ışık tutuyor. Ama sicim kuramı bağlamında bu simetriler birer *sonuçtur,* bu önemlerini hiçbir biçimde azaltmasa da, çok daha geniş kapsamlı bir kuramsal yapının nihai ürününün bir parçasıdırlar.

Bu tartışma, şu soruyla ilgili büyük bir açılım getiriyor: Sicim kuramının kendisi de, eşdeğerlik ilkesinin kaçınılmaz olarak genel göreliliğe varması ya da ayar simetrilerinin kütleçekimi dışındaki kuvvetlere varmasına çok benzer biçimde daha geniş kapsamlı bir ilkenin -mutlaka değil muhtemelen bir simetri ilkesinin- kaçınılmaz bir sonucu mudur? Bu satırları kaleme aldığımız sırada kimsenin bu sorunun cevabıyla ilgili derinlikli bir fikri yoktu. Böyle bir fikrin önemini değerlendirebilmek için, Einstein'ın 1907'de Bern patent ofisinde deneyimlediği, onu eşdeğerlik ilkesine götüren, o mutluluk verici düşünce olmaksızın genel göreliliği formüle etmeye çalıştığını düşünmemiz yeter de artar bile. Önce bu kilit önemdeki derin kavrayışa sahip olmaksızın genel göreliliği formüle etmek imkânsız olmayabilirdi, fakat kesinlikle son derece zor olurdu. Eşdeğerlik ilkesi, kütleçekimi kuvvetinin analizi için az ve öz, sistematik ve güçlü bir örgütleyici çerçeve ortaya koyar. Örneğin III. Bölüm'de vermiş olduğumuz genel görelilik tanımı, esasen eşdeğerlik ilkesine dayanır; eşdeğerlik ilkesinin kuramın matematiksel formelliği içindeki rolü çok daha önemlidir.

Şu anda sicim kuramcıları, Einstein'ın eşdeğerlik ilkesinden yoksun olmasına benzer bir konumdadırlar. Veneziano'nun 1968'deki

isabetli tahmininden buyana, keşiften keşfe, devrimden devrime kuramın parçaları bir araya getirilmiştir. Fakat bütün bu keşifleri ve kuramın diğer özelliklerini her şeyi birleştiren, sistematik bir çerçevede -tek tek her bileşenin varlığını mutlaka kaçınılmaz kılan bir çerçevede- bir araya getiren temel bir örgütleyici ilke hâlâ kayıptır. Bu ilkenin keşfi sicim kuramının gelişiminde bir dönüm noktası olacaktır, çünkü bu temel ilke muhtemelen kuramın iç işleyişini görülmemiş bir açıklıkla ortaya koyacaktır. Elbette ki, böyle temel bir ilkenin var olduğunun hiçbir garantisi yoktur, fakat son yüzyıl içinde fiziğin gelişimi sicim kuramcılarına, bu ilkenin var olduğu yönünde büyük umutlar besleme cesareti vermiştir. Sicim kuramının gelişiminde bir sonraki aşamaya baktığımızda, "kaçınılmazlık ilkesi"ni "kuramın tamamının kaynağında yatıyor olması gereken temel fikri" bulmanın en büyük öncelik haline geldiğini söyleyebiliriz.

Uzay ve Zaman Aslında Nedir, Onlarsız Yapabilir Miyiz?

Önceki bölümlerin birçoğunda, uzay ve uzay-zaman kavramlarını serbestçe kullandık. II. Bölüm'de, Einstein'ın beklenmedik bir olgu sayesinde (bir nesnenin uzaydaki hareketinin zaman içinden geçişi üzerinde bir etkisi olduğu olgusu sayesinde) uzay ve zamanın ayrılmaz bir biçimde iç içe geçtiğini nasıl fark ettiğini anlatmıştık. III. Bölüm'de, uzay-zamanın kozmosun açılmasındaki rolüne dair anlayışımızı genel görelilik sayesinde derinleştirdik; genel görelilik uzay-zaman dokusunun ayrıntılı şeklinin kütleçekimi kuvvetini bir yerden diğerine ilettiğini göstermektedir. IV. ve V. Bölüm'de tartıştığımız üzere, dokunun mikroskobik yapısındaki şiddetli kuantum dalgalanmaları yeni bir kuram ihtiyacı ortaya çıkarmış, böylece sicim kuramına varmıştık. Son olarak, izleyen bölümlerde de sicim kuramının, evrende bildiğimizden çok daha fazla sayıda boyut bulunduğu, bunların bazılarının küçük fakat karmaşık şekiller halinde kıvrılmış olduğu, bu şekillerin dokularının delinmesi, yırtılması, sonra kendi kendini onarmasıyla harika dönüşümler geçirdiği iddiasını ortaya attığını görmüştük.

Şekil 3.4, 3.6 ve 8.10'da, uzay ve uzay-zamanın dokusunu evrenin kesilip biçildiği bir malzeme parçasıymış gibi hayal ederek bu fikirleri

resmetmeye çalışmıştık. Bu resimler hatırı sayılır bir açıklama gücüne sahiptir; fizikçiler genellikle teknik çalışmalarında bunları görsel bir rehber olarak kullanırlar. Bahsettiğimiz bu şekillere benzer şekillere bakmak, terimin anlamına dair yavaş yavaş bir izlenim verse de, hâlâ şu soruyu soruyor olabiliriz: "Evrenin dokusu derken, *gerçekten* ne demek istiyoruz?"

Bu soru, şu veya bu biçimde yüzlerce yıldır devam eden bir tartışmanın konusu olmuş köklü bir sorudur. Newton, uzay ve zamanın, kozmosun düzeninde yer alan ebedi ve değişmez bileşenler olduğunu, soru ve açıklamanın sınırları dışında kalan bozulmamış yapılar olduğunu ilan etmişti. *Prirıcipia'da* şöyle yazmıştı: "Mutlak uzay, doğası itibarıyla, dışsal hiçbir şeyle ilişkisi olmaksızın hep aynı ve sabit kalır. Mutlak, gerçek ve matematiksel zaman da, kendi başına ve doğası itibarıyla dışsal hiçbir şeyle ilişkisi olmaksızın akar." Gottfried Leibniz ve diğerleri, buna var güçleriyle karşı çıkmışlar, uzay ve zamanın evrendeki nesneler ve olaylar arasındaki ilişkileri uygun bir biçimde özetlemeye yönelik çetele tutma aygıtlarından ibaret olduğunu iddia etmişlerdi. Bir nesnenin uzay ve zamandaki yeri, ancak ve ancak bir diğeriyle kıyaslanması halinde anlamlıdır. Uzay ve zaman bu ilişkilerin lügatidir, daha fazlası değildir. Newton'un deneysel olarak başarılı üç hareket yasasıyla desteklenen bakış açısı, iki yüzyılı aşkın bir süredir etkili olsa da, Leibniz'in daha sonra Avusturyalı fizikçi Ernst Mach tarafından geliştirilen kavrayışı bugünkü tablomuza çok daha yakındır. Daha önce görmüş olduğumuz gibi, Einstein'ın özel ve genel görelilik kuramları mutlak ve evrensel bir uzay ve zaman kavrayışını kesinlikle bir kenara bırakmıştır. Fakat yine de, genel görelilik ve sicim kuramında böyle öncü bir rol oynayan geometrik uzay-zaman modelinin, çeşitli yerler arasındaki uzamsal ve zamansal ilişkilere uygun düşen bir stenodan mı ibaret olduğu, yoksa uzay-zaman dokusu içine gömülmüş olduğumuzdan bahsederken kendimizi gerçekten de *bir şeyin* içine gömülü olarak mı görmemiz gerektiğini sorabiliriz.

Spekülatif alanlara uzanıyor olsak da, sicim kuramı bu soruya bir cevap veriyor. Graviton, kütleçekimi kuvvetinin en küçük demeti, bir

sicim titreşim örüntüsüdür. Görünebilir ışık gibi elektromanyetik bir alan muazzam sayıda fotondan oluşuyorsa, bir kütleçekimi alanı da muazzam sayıda gravitondan, yani graviton titreşim örüntüsünü oluşturan muazzam sayıda sicimden oluşur, kütleçekimi alanlarıysa, uzay-zaman dokusunun kıvrılmasında şifrelenmiştir; dolayısıyla uzay-zaman dokusunu, hepsi de aynı graviton titreşim örüntüsünü düzenli bir biçimde geçiren muazzam sayıda sicimle tanımlamaya yöneliriz. Alanın diliyle, böyle muazzam sayıda, benzer şekilde titreşen organize sicimler dizisi sicimlerin *tutarlı hali* olarak bilinir. Sicim kuramının sicimlerini uzay-zaman dokusunun ilmekleri olarak görmek biraz şürsel bir imge ama hâlâ bunun kesin anlamının tam olarak ortaya çıkarılması gerekiyor.

Yine de, uzay-zaman dokusunu sicim ilmeklerinin birbirine iliştirilmesiyle tanımlamak, bizi aşağıdaki soru hakkında düşünmeye yöneltiyor. Sıradan bir dokuma parçası, birinin tek tek ilmekleri, yani bildiğimiz tekstil ürünlerinin hammaddesini, titizlikle örmesinin nihai ürünüdür. Benzer şekilde, uzay-zaman dokusunun da işlenmemiş, ham bir habercisi -kozmik dokudaki sicimlerin henüz birleşip uzay-zaman olarak tanıdığımız örgütlü biçimi almamış bir konfigürasyonu-olup olmadığı sorusunu sorabiliriz kendimize. Dikkat edin, bu durumu titreşmekte olan tek tek sicimlerden oluşan, henüz ilmekler halinde birleşip düzenli bir bütün oluşturamamış karmaşık bir kitle olarak resmetmek biraz hatalı olur; çünkü olağan düşünme biçimimize göre bu durum hem uzaya hem zamana dair bir kavrayışı gerektirir: Bir sicimin titreştiği bir uzayı ve bir andan diğerine sicimin şeklinde meydana gelen değişiklikleri izlememizi mümkün kılan zamanın ilerlemesini. Fakat işlenmemiş durumda, kozmik dokuyu oluşturan sicimlerin tartışmakta olduğumuz düzenli, tutarlı titreşim dansına girişmesinden önce, *uzay ve zamana dair bir idrakyoktur.* Dilimiz dahi bu fikirleri ele alamayacak kadar kabadır, çünkü aslında bir *önce* kavrayışı yoktur. Bir anlamda, tek tek sicimler uzay ve zamanın parçasıymış gibidir, ve ancak uygun biçimde birbirine yakın titreşimler gerçekleştirdiklerinde bildiğimiz uzay ve zaman kavramları ortaya çıkıyor gibidir.

Böyle yapışız, bildiğimiz biçimiyle uzay ya da zaman kavramlarının bulunmadığı, bir ilk varoluş halini tasavvur etmek, birçok kişinin idrak gücünün sınırlarını zorlar (kuşkusuz benimkini zorluyor). Stephen Wright'ın ufkun yakın çekim bir fotoğrafını çekmeyi kafaya takmış fotoğrafçısı gibi, *olan,* fakat bir şekilde uzay ya da zaman kavramlarını gündeme getirmeyen bir evren hayal etmeye çalıştığımızda bir paradigmalar çalışmasıyla burun buruna geliyoruz. Yine de, sicim kuramını tam anlamıyla değerlendirmeden önce, muhtemelen bu tür fikirlerle uzlaşmamız ve uygulanma biçimlerini anlamamız gerekecektir. Bunun sebebi de, bugünkü sicim kuramı formülasyonumuzun, içinde sicimlerin (ve M-kuramı da dahil diğer bileşenlerin) hareket ettiği ve titreştiği uzay ve zamanın varlığını gerektirmesidir. Bu da, bir zaman boyutuna, belli sayıda yer kaplayan uzay boyutuna (genelde bu sayının üç olduğu varsayılır) ve kuramın denklemlerinin mümkün kıldığı şekillerden biri halinde kıvrılmış ek boyutlara sahip bir evrende sicim kuramının fiziksel özelliklerini çıkarmamızı sağlar. Gelgelelim bu durum biraz, bir sanatçının yaratıcı yeteneklerini numaraları birleştirip ortaya çıkan şekli boyamasını şart koşarak değerlendirmeye benzer. Sanatçımız kuşkusuz resmin şurasına burasına kendine özgü bir hava katacaktır, fakat yaptığı çalışmanın formatını bu kadar sıkı bir kısıtlamaya tabi tutarsak yeteneklerini ancak yetersiz bir biçimde görebiliriz, yeteneklerinin tamamından bihaber kalırız. Keza, sicim kuramının başarısı kuantum mekaniği ile kütleçekimi birleştirmek olduğundan, kütleçekimi de uzay ve zamanın biçimine bağlı olduğundan, kuramı, zaten mevcut olan bir uzay-zaman çerçevesi içinde işlemeye zorlayarak kısıtlamamamız gerekir. Onun yerine, nasıl ki sanatçımızın boş bir tuval üzerinde çalışmasına izin vermemiz gerekiyorsa, sicim kuramının da uzaysız ve zamansız bir konfigürasyonla yola çıkıp kendi uzay-zaman arenasını *yaratmasına* izin vermemiz gerekir.

Umudumuz odur ki, bu bomboş başlangıç noktasından hareketle -muhtemelen Büyük Patlama öncesinde var olan ya da Büyük Patlama öncesinden önceki bir dönemdedir bu başlangıç noktası kuram, arkaplanda tutarlı sicim titreşimlerinin belirdiği, bu titreşimlerin bildiğimiz uzay ve zaman kavramlarını ortaya çıkardığı

bir biçime bürünen bir evreni betimleyecektir. Böyle bir çerçeve, ortaya çıkarılırsa eğer, uzay, zaman ve onlarla ilişkili olarak boyutun, evrenin esas tanımlayıcı unsurları olmadığını, aksine bunların daha temel bir ilk halden doğan, kolayca ele geçen kavramlar olduğunu gösterecektir.

M-kuramının çeşitli yönleriyle ilgili, Stephen Shenker, Edward Witten, Tom Banks, Willy Fischler, Leonard Susskind ve tek tek adlarını sayamayacağım kadar çok sayıda fizikçinin başını çektiği son araştırmalar, sıfır-zar diye bilinen bir şeyin -muhtemelen M-kuramının en temel bileşeninin, uzak mesafelerde bir nokta parçacık gibi davranan, ama kısa mesafelerde ciddi biçimde farklı özellikler gösteren bir nesnenin- uzaysız ve zamansız alana dair bize anlık bir görünüm sunabileceğini çoktan göstermiştir. Bu fizikçilerin çalışmaları, sicimlerin Planck ölçeği altında alışıldık uzay kavramlarının konuyla ilgisiz hale geldiğini gösterdiğini, sıfır-zarların da aynı sonucu verdiğini, fakat aynı zamanda Planck ölçeği altındaki yeni, bilinmedik çerçeveye de küçük bir pencere açtığını ortaya koymuştur. Bu sıfır-zarlarla yapılan çalışmalar sonucu, olağan geometrinin yerini, *noncommutative geometri* denilen bir şey, matematiğin büyük ölçüde Fransız matematikçi Alain Connes tarafından geliştirilen bir alanı almıştır. Bu geometrik çerçevede, uzay ve noktalar arasındaki mesafelerle ilgili bildik kavramlar eriyip gider, son derece farklı bir kavramsal manzarada buluruz kendimizi. Yine de fizikçiler, dikkatimizi Planck uzunluğundan daha büyük ölçeklere odakladığımızda, bildik uzay kavramımızın yeniden ortaya çıktığını göstermişlerdir. *Noncommutative* geometri çerçevesinin, yukarıda tahmin ettiğimiz boş hale varmak için önemli birkaç adım daha atması gerekmektedir muhtemelen, fakat bu çerçeve uzay ve zamanı birleştirmeye yönelik daha eksiksiz bir çerçevenin neler içerebileceğine dair bir ipucu vermektedir.

Sicim kuramını, önceden var olan uzay ve zaman kavramına başvurmaksızın formüle etmeye yarayacak doğru matematiksel aygıtı bulmak, sicim kuramcılarının karşı karşıya olduğu en önemli meselelerden biridir. Uzay ve zamanın nasıl ortaya çıktığına dair bir anlayış, dev bir adım atıp aslında hangi geometrik biçimin *ortaya*

çıktığı sorusunu, bu önemli soruyu cevaplamaya yaklaşmamızı sağlayacaktır.

Sicim Kuramı Kuantum Mekaniğinin Yeniden Formüle Edilmesine Yol Açacak mı?

Evren, fantastik bir isabetlilikle kuantum ilkeleri tarafından yönetilir. Hal böyleyken, fizikçiler geçen yarım yüzyıl içinde kuramların formülasyonunda, yapıyı dikkate alarak konuşacak olursak, kuantum mekaniğini biraz ikincil bir konuma yerleştiren bir strateji izlemişlerdir. Fizikçiler, kuramlar geliştirirken genelde, kuantum olasılıklarını, dalga fonksiyonlarını vs. göz ardı eden tümüyle klasik bir dilde -Maxwell'in, hatta Newton'un çağında fizikçiler için mükemmel derecede anlaşılabilir olacak bir dilde- çalışmaya başlar; sonra bunun ardından klasik çerçevenin üzerine kuantum kavramlarını yayar. Bu yaklaşım o kadar da şaşırtıcı değildir, çünkü deneyimlerimizi doğrudan yansıtır. İlk bakışta evren, bir parçacığın belli bir anda belli bir konumda ve belli bir hızda olması gibi klasik kavramlara dayanan kanunlarla yönetiliyormuş gibi görünmektedir. Ancak ayrıntılı mikroskobik incelemelerden sonra, bu tür bildik klasik fikirleri değiştirmemiz gerektiğini fark ediyoruz. Keşif sürecimiz, klasik bir çerçeveden çıkıp kuantum keşifleriyle değiştirilen bir çerçeveye varmıştır, bu ilerleme de fizikçilerin bugüne kadar kuramlarını inşa ederken izledikleri yola yansımıştır.

Sicim kuramıyla ilgili olarak da durum kesinlikle budur. Sicim kuramını betimleyen matematiksel formellik, küçük, sonsuz derecede ince *klasik* bir ilmeğin hareketini anlatan denklemlerle -büyük ölçüde Newton'un şöyle bir üç yüzyıl kadar önce yazmış olabileceği denklemlerle- başlar. Bu denklemler daha sonra *kuantize* edilir. Yani, fizikçilerin 50 yılı aşkın bir zaman zarfında geliştirdiği sistematik bir tavırla, klasik denklemler olasılıkları, belirsizliği, kuantum çalkalanmalarını doğrudan içeren kuantum mekaniğine özgü bir çerçeveye çevrilir. Aslına bakarsınız XII. Bölüm'de bu prosedürün nasıl işlediğini görmüştük: ilmek süreçleri (şekil 12.6) kuantum kavramlar -bu örnekte, sanal sicim çiftlerinin anlık kuantum

mekaniğine özgü yaratımı- içerir; ilmek sayısı kuantum mekaniğine özgü etkileri açıklayan kesinliği belirler.

Klasik bir kuramsal betimlemeyle yola çıkıp sonra kuantum mekaniğinin özelliklerini işe dahil etme stratejisi, yıllarca son derece verimli olmuştur. Örneğin standart parçacık fiziğinin temelinde bu yatar. Fakat bu yöntemin sicim kuramı ve M-kuramı gibi geniş kapsamlı kuramları ele alamayacak kadar kapalı olması da mümkündür ve muhtemelen böyle olduğuna işaret eden kanıtların sayısı giderek artmaktadır. Bunun sebebi, evrenin kuantum mekaniğine özgü ilkelerle yönetildiğini fark ettiğimizde, artık kuramlarımızın da daha en baştan gerçekten kuantum mekaniğine özgü olmasının gerekmesidir. Klasik bir yaklaşımdan başlayıp şimdiye kadar başarılı bir biçimde idare edebildik, ama artık bu kaba yaklaşımın bizi yanıltmaya başlayacağı bir düzeydeyiz. Sicim/M-kuramının derinliğiyle birlikte, mücadelelerle sınanmış bu stratejinin son noktasına gelmiş olabiliriz pekâlâ.

İkinci süpersicim devriminden doğan bazı derinlikli kavrayışları (örneğin şekil 12.11'de özetlendiği biçimiyle) yeniden değerlendirerek bu yönde özel kanıtlar bulabiliriz. XII. Bölüm'de tartıştığımız üzere, beş sicim kuramının birliğinin temelinde yatan ikilikler, bu sicim formülasyonlarının herhangi birinde ortaya çıkan fiziksel süreçlerin, başka herhangi bir formülasyonun ikili diliyle yeniden yorumlanabileceğini gösterir. İlk bakışta bu yorumun, ilk tanımla pek ilgisi yokmuş gibi görünecektir, fakat aslında ikiliğin gücü iş başındadır: ikilik yoluyla bir fiziksel süreç, çok sayıda farklı biçimlerde tanımlanabilir. Bu sonuçlar hem ince, hem dikkat çekicidir, fakat en önemli özelliklerinin ne olabileceğini henüz dile getirmedik.

İkilik çevirilerinde, genellikle, beş sicim kuramından birinde tanımlanan, kuantum mekaniğine kuvvetle bağlı bir süreç (örneğin Dünya kuantum fiziğiyle değil de klasik fizikle yönetiliyor olsa ortaya çıkmayacak sicim etkileşimlerini içeren bir süreç) alınır ve bir başka sicim kuramının perspektifinden kuantum mekaniğiyle zayıf bağları olan bir süreç (örneğin, ayrıntılı sayısal özellikleri kuantum değerlendirmelerinden etkilenen, ama niceliksel biçimi tümüyle klasik

dünyada olabileceği biçime benzeyen bir süreç) olarak yeniden formüle edilir. Bu da kuantum mekaniğinin sicim/M-kuramının temelindeki ikilik simetrileriyle sıkı sıkıya iç içe geçmiş olduğu anlamına gelir: Bu simetriler, doğaları itibarıyla kuantum mekaniğine özgü simetrilerdir, çünkü ikilik betimlemelerinden biri kuantum değerlendirmelerinden oldukça etkilenmiştir. Bu da sicim/M-kurammın eksiksiz formülasyonunun -yeni bulunmuş ikilik simetrilerini en temelde içine alan bir formülasyonun- geleneksel kalıp uyarınca klasik bir biçimde başlayıp sonra kuantize edilerek ilerleyemeyeceğine işaret eder. Klasik bir başlangıç noktası, ikilik simetrilerini mutlaka atlayacaktır, çünkü bu simetriler ancak ve ancak kuantum mekaniği değerlendirmeye alındığında geçerlidir. Daha çok, sicim/M-kuramının eksiksiz formülasyonunun geleneksel kalıbı kırması ve tam kuantum mekaniğine özgü bir kuram olarak varlık bulması gerekiyormuş gibi görünmektedir.

Bunun nasıl yapılacağını bugün kimse bilmiyor. Ama sicim kuramcılarının birçoğu, kuantum ilkelerinin evrenle ilgili kuramsal tanımımıza nasıl dahil edileceğine ilişkin biryeniden formülasyonun, anlayışımızda gerçekleşecek bir sonraki büyük alt üst oluş olacağı öngörüsünde bulunmaktadır. Örneğin Cumrun Vafa şöyle demiştir: "Kuantum mekaniğiyle ilgili, onun birçok muammasını çözecek bir yeniden formülasyonun kapıda olduğu kanısındayım. Kısa süre önce keşfedilen ikiliklerin, kuantum mekaniğiyle ilgili olarak, uzay, zaman ve kuantum özelliklerinin ayrılmaz bir biçimde birleştirileceği daha geometrik, yeni bir çerçeveye işaret ettiği görüşünü birçok kişinin paylaştığını düşünüyorum Edward Witten ise şunları söylemiştir: "inanıyorum ki, kuantum mekaniğinin mantıksal statüsü, Einstein'ın eşdeğerlik ilkesini keşfetmesi sonrasında kütleçekimin mantıksal statüsünün değişmesine benzer bir biçimde değişecektir. Bu süreç, kuantum mekaniğiyle ilgili olarak henüz tamamlanmış değil, fakat bir gün insanların bizim dönemimizi bu sürecin başladığı dönem olarak göreceği kanısındayım.

Savunmacı bir iyimserlikle, kuantum mekaniği ilkelerinin sicim kuramı çerçevesinde yeni bir çerçeveye oturtulmasının, evrenin nasıl başladığı, neden uzay ve zaman gibi şeyler bulunduğu sorusuna bir

cevap verebilecek daha güçlü bir formelliği -Leibniz'in sorduğu, "Neden herhangi bir şey yok değil de var?" sorusunu cevaplamaya bizi bir adım daha yaklaştıracak bir formelliği- beraberinde getirebileceğini hayal edebiliriz.

Sicim Kuramı Deneysel Olarak Sınanabilir mi?:

Sicim kuramının önceki bölümlerde tartıştığımız birçok özelliği arasında şu üçü, aklımızdan hiç çıkarmamamız gereken belki de en önemlilerindendir: Öncelikle kütleçekimi ve kuantum mekaniği evrenin işleme biçiminin bir parçasıdır, dolayısıyla birleşik kuram olmayı amaçlayan bir kuram her ikisini de içermelidir. Sicim kuramı bunu başarır. İkincisi, fizikçilerin geçen yüzyılda yaptığı çalışmalar, evren anlayışımız açısından temel önemdeymiş gibi görünen başka kilit fikirler -birçoğu deneysel olarak doğrulanmış- olduğunu da ortaya koymuştur. Bunlar arasında, spin, madde parçacıklarının aile yapısı, haberci parçacıklar, ayar simetrisi, eşdeğerlik ilkesi, simetri kırılması ve süpersimetri gibi kavramları sayabiliriz. Bu kavramların hepsi de doğal olarak sicim kuramından doğmuştur. Üçüncüsü, standart model gibi, deneysel ölçümlerle uyuşma sağlamak için değiştirilebilecek 19 tane serbest parametresi bulunan daha geleneksel bazı kuramların tersine, sicim kuramının değiştirilebilir parametresi yoktur. Prensipte kuramın içerimleri, katı bir kesinlik içermelidir; kuramın doğru mu, yanlış mı olduğuna dair muğlaklıktan uzak bir test ortaya koymalıdır.

"Prensip"teki bu muhakemeden "pratik"teki olguya giden yol birçok engellerle doludur. IX. Bölüm'de diğer boyutların biçimlerini belirlemek gibi, önümüzde duran bazı teknik engellerden bahsetmiştik. XII. ve XII. Bölüm'de bunları ve diğer engelleri, görmüş olduğumuz gibi doğal olarak bizi M-kuramını değerlendirmeye yönelten daha geniş kapsamlı bir bağlama, sicim kuramıyla ilgili kesin bir anlayışa varma ihtiyacımız bağlamına yerleştirmiştik. Sicim/M-kuramına dair eksiksiz bir anlayışa ulaşmak, kuşkusuz çok büyük bir çalışma, aynı derecede büyük bir deha gerektirmektedir.

Bu yolun her adımında, sicim kuramcıları kuramın deneysel olarak gözlenebilir sonuçlarını aramışlardır, aramayı da sürdüreceklerdir. IX. Bölüm'de tartışmış olduğumuz üzere sicim kuramını destekleyecek kanıtlar bulma konusunda, başarılı olma ihtimali azmış gibi görünen olasılıkları da gözden kaçırmamalıyız. Dahası kavrayışımız derinleştikçe, sicim kuramı başka deneysel yaklaşımları gündeme getiren az rastlanır süreçleri ya da özellikleri de ortaya çıkacaktır hiç kuşkusuz.

Fakat en önemlisi, IX. Bölüm'de tartışmış olduğumuz üzere süpereş parçacıkların keşfedilmesi sayesinde süpersimetrinin doğrulanması, sicim kuramı açısından büyük bir dönüm noktası olacaktır. Süpersimetrinin, sicim kuramıyla ilgili kuramsal incelemeler sırasında keşfedildiğini, kuramın temel parçalarından biri olduğunu hatırlayalım. Süpersimetrinin doğrulanması, sicimlere dair ikinci derecede olsa da, zorlayıcı bir kanıt olacaktır. Dahası süpereş parçacıkların bulunması, hoş karşılanan bir zorluk olacaktır, çünkü süpersimetrinin keşfi, salt dünyamızla ilgisi olup olmadığına dair evet-hayır sorusunu cevaplamaktan çok daha fazlasını yapacaktır. Süpereş parçacıkların kütleleri ve yükleri, süpersimetrinin doğa yasalarına nasıl ayrıntılı bir biçimde dahil olduğunu aydınlatacaktır. Bunun ardından sicim kuramcıları, bu uygulamanın sicim kuramı çerçevesinde tam anlamıyla gerçekleşip gerçekleşemeyeceğini ya da açıklanıp açıklanamayacağını görme sınavıyla karşı karşıya kalacaktır. Elbette ki daha iyimser olup gelecek on yıl içinde -Cenevre'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın çalışmaya başlamasından önce- sicim kuramı anlayışımızın, süpereşlerin umulan keşfinden önce onlarla ilgili ayrıntılı tahminler yapılmasına elverecek kadar ilerlemesini umut edebiliriz. Bu tür tahminlerin doğrulanması, bilim tarihinin anıtsal anlarından biri olacaktır.

Açıklamanın Sınırları Var mıdır?

Eler şeyi anlamak, evrenin temel bileşenleri ve kuvvetlerinin bütün yönlerini anlamak gibi sınırlı bir anlamda da olsa, bilimin bugüne dek karşı karşıya kaldığı en büyük güçlüklerden biridir. Süpersicim kuramı bu zorluğu göğüslememizi sağlayacak derinlikteymiş gibi

görünen bir çerçeve sunmuştur ilk kez. Fakat kuramın vaadini eksiksiz olarak anlayıp örneğin kuarkların kütlelerini ya da elektromanyetik kuvvetin gücünü, kesin değerleri evrenle ilgili bu kadar çok şeyi yönlendiren bu rakamları hesaplayabilecek miyiz? Daha önceki bölümlerde olduğu gibi, bu hedeflere -bugün bunların en önemlisi tedirginlik yaklaşımına hiçbir biçimde dayanmayan bir sicim/M-kuramı formülasyonuna ulaşmaktır- giden yol çok sayıda kuramsal engelle doludur.

Peki ama, sicim/M-kuramına dair, yeni ve çok daha şeffafbir kuantum mekaniği formülasyonu çerçevesine oturtulmuş kesin bir anlayışa ulaşmış olsak bile, parçacık kütlelerini ve kuvvet güçlerini hesaplama arayışımızda başarısızlığa uğramamız mümkün müdür? Bu değerleri bulabilmek için yine kuramsal hesaplamalardan ziyade, deneysel ölçümlere başvurmak zorunda kalacak olmamız mümkün müdür? Dahası bu başarısızlık, daha derin bir kuram aramamız gerektiği anlamına gelmeyip gerçekliğin bu gözlenen özelliklerinin bir açıklaması *olmadığını* yansıtıyor olabilir mi?

Bu sorulara derhal verilebilecek cevaplardan biri "evet" olabilir. Einstein'ın bir zaman önce dediği gibi, "Evrenle ilgili en anlaşılmaz şey, anlaşılabilir olmasıdır."' Evreni anlama becerimiz karşısındaki hayretimiz, hızlı ve etkileyici bir ilerleme çağında kolayca gözden kaçırılmaktadır. Gelgelelim, belki de anlaşılabilirliğin bir sınırı vardır. Belki de, bilimin sunabileceği, olabildiğince derin bir anlayış düzeyine vardıktan sonra, yine de evrenin açıklanamayan bazı yönleri kalacağını kabul etmemiz gerekiyor. Geçmişte bilimsel yöntemin başarısı, yeterince zaman ve çabayla evrenin gizemlerini *aydınlatabileceğimizi* düşünme cesareti vermişti bize. Fakat bilimsel açıklamanın mutlak sınırına varmak -teknolojik bir engelle karşılaşmak ya da insan anlayışının mevcut, fakat ilerleyen sınırına varmak değil- görülmemiş bir olay olacaktır, geçmiş deneyimlerimizin bizi hazırlamış olamayacağı bir olay.

Nihai kuram arayışımızla büyük bir ilgisi olsa da, bu henüz çözemeyeceğimiz bir meseledir; hatta, bilimsel açıklamanın sınırları olması olasılığı, ifade ettiğimiz kapsamlı biçimiyle, hiç

çözülemeyecek bir meseledir. Örneğin, ilk bakışta bilimsel açıklamaya kesin bir sınır getiriyormuş gibi görünen spekülatif *çoklu evren* kavramını dahi, en azından ilkesel olarak tahmin gücünü tekrar ayağa kaldıran aynı derecede spekülatif kuramlar hayal ederek ele alabileceğimizi görmüştük.

Bu değerlendirmelerden ortaya çıkan aydınlatıcı bir nokta, kozmolojinin nihai bir kuramın içerimlerinin belirlenmesindeki rolüdür. Tartışmış olduğumuz gibi süpersicim kozmolojisi, sicim kuramının koyduğu yeni standartlara göre bile genç bir alandır. Kuşkusuz gelecek yıllarda, araştırmaların odaklanacağı başlıca alanlardan biri, muhtemelen fiziğin büyüyen başlıca alanlarından biri olacaktır. Sicim/M-kuramının özelliklerine dair yeni kavrayışlar edindikçe, birleşik bir kurama varma yönündeki bu zengin girişimin kozmolojik içerimleri daha da keskinlik kazanacaktır. Elbette ki, bu tür araştırmaların bir gün bizi, gerçekten de bilimsel açıklamanın bir sınırı olduğuna ikna etmesi mümkündür. Fakat tersine, yeni bir çağı - evrenle ilgili temel bir açıklamanın nihayet bulunduğunu ilan edebileceğimiz bir çağıda başlatabilirler.

Yıldızlara Uzanmak

Teknolojik olarak Dünyayla ve onun Güneş sistemindeki yakın komşularıyla sınırlı olsak da, düşünmenin ve deneylerin gücüyle hem iç hem de dış uzayın ücra bölgelerini araştırmış bulunuyoruz. Özellikle de son yüzyıl içinde sayılamayacak kadar çok sayıda fizikçinin kolektif çabası, doğanın en gizli tutulmuş sırlarından bazılarını ortaya çıkardı. Bu açıklayıcı cevherler ortaya dökülür dökülmez, bildiğimizi sandığımız, fakat ihtişamını tahayyül etmenin yakınından dahi geçmediğimiz bir dünyaya dair hayallerin kapısını açtı. Bir fizik kuramının derinliğinin ölçülerinden biri de, dünya görüşümüzün daha önceden değişmezmiş gibi görünen veçhelerinin karşısına ne derece ciddi sorular çıkardığıdır. Bu ölçüye vurulduğunda, kuantum mekaniği ve görelilik kuramı en büyük beklentilerin ötesinde bir derinliğe sahiptir: Dalga fonksiyonları, olasılıklar, kuantum tünelleri, boşluktaki kesintisiz kaynayan enerji dalgalanmaları, uzay ve zamanın birlikte silinmesi, eşzamanlılığın

göreli niteliği, uzay-zaman dokusunun kıvrılması, kara delikler, Büyük Patlama. Sezgisel, mekanik, saat gibi işleyen Newtoncu perspektifin bu kadar dar görüşlü olduğunun anlaşılacağını kim tahmin edebilirdi? Sıradan bir biçimde deneyimlendikleri halleriyle şeylerin yüzeyinin hemen altında, kafa karıştırıcı, yepyeni bir dünyanın yattığını kim tahmin edebilirdi?

Fakat bu paradigmaları sarsan keşifler bile, daha geniş kapsamlı, her şeyi içine alan bir hikâyenin parçasıdır yalnızca. Fizikçiler, büyük olanla ve küçük olanla ilgili yasaların tutarlı bir bütün içinde yerli yerine oturması gerektiğine duydukları sarsılmaz inançla, o ele geçmez birleşik kuramın amansız takipçileri olmuşlardır. Arayış sona ermiş değildir, fakat süpersicim kuramı ve kuramın M-kuramına dönüşmesiyle birlikte, kuantum mekaniği, genel görelilik, güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetleri birleştiren tutarlı bir çerçeve nihayet ortaya çıkmıştır. Bu gelişmelerin, daha önceleri geçerli olan dünyayı görme biçimimizin karşısına çıkardığı zorluklar devasadır: Yaratılan her şeyi, uzamsal dokularının yırtıldığı, sonra kendini yeniden onardığı uç noktada bükülmeler geçirebilecek çok sayıda gizli boyutun bulunduğu bir evrende titizlikle icra edilen titreşim örüntülerinde birleştiren sicim ilmekleri ve salınım halindeki kürecikler. Kütle çekimi ve kuantum mekaniğinin, bütün madde ve bütün kuvvetlere dair birleşik bir kuram çerçevesinde birleştirilmesinin, evrenin nasıl işlediğine dair kavrayışımızda böyle bir devrime yol açabileceğini kim tahmin edebilirdi?

Kuşkusuz, süpersicim kuramıyla ilgili olarak, eksiksiz ve hesaplamalara dayanarak izlenebilir bir anlayışa varma arayışımızı sürdürürken bizi bekleyen daha büyük sürprizler olacaktır. M-kuramı çerçevesinde yapılmış çalışmalar sayesinde, evrenin, Planck uzunluğunun altında gizlenmiş, muhtemelen zaman ve uzay kavramlarının olmadığı, yeni, tuhaf bir alanından manzaralar görmüştük. Bunun tam karşıtı uç noktadaysa, evrenimizin *çoklu evren* denilen engin ve karmakarışık bir kozmik okyanusun yüzeyindeki sayılamayacak kadar çok baloncuktan yalnızca biri olabileceğini de gördük. Bu fikirler, bugün spekülasyonların geldiği

son noktadır, fakat evren anlayışımızdaki bir sonraki sıçramanın habercisi olabilirler.

Gözlerimizi geleceğe dikip bizi bekleyen harikaları beklerken, geçmişi düşünüp buraya kadaryapmış olduğumuz yolculuğa da hayretle, hayranlıkla bakmamız gerekiyor. Evrenin temel yasalarının peşinde sürdürülen arayış, aklı genişleten, ruhu zenginleştiren, kesinlikle insani bir dramdır. Einstein'ın, kendisinin kütleçekimi anlama macerasına dair renkli betimlemesi -"karanlıkta geçen o gerilimli arayış yılları, o yılların yoğun özlemi, güvenin yerini hayalkırıklığmm, hayalkırıklığının yerini güvenin alması, nihayetinde ışığa çıkmak"- kuşkusuz insanlığın bütün bir mücadelesini içine alıyor. Hepimiz kendi yolumuzdan giderek hakikati arıyoruz, hepimiz neden burada olduğumuz sorusunun cevabına özlem duyuyoruz. Açıklamalar dağına hep birlikte tırmanırken, her kuşak kendinden önceki kuşağın omuzları üstünde yükselerek cesurca zirveye uzanıyor. Bizden sonraki kuşaklardan biri zirveyi görüp sonsuz açıklıkta bir perspektifle evrenin enginliğini ve zarafetini izleyebilecek mi, bunu öngöremiyoruz. Ama her kuşak biraz daha yukarı tırmanıyor, bu noktada Jacob Bronowski'nin "Her çağda bir dönüm noktası vardır, dünyanın tutarlılığını görmenin ve ortaya koymanın yeni bir biçimi vardır,"' sözlerini idrak ediyoruz. Bizim kuşağımız evrene dair çizdiğimiz yeni tabloya -dünyanın tutarlılığını ortaya koyarken izlediğimiz yeni tarza- hayranlık dolu bir ilgiyle yaklaşırken, insanların yıldızlara uzattığı merdivene kendi basamağımızı eklemiş, rolümüzü tamamlamış oluyoruz.